



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DAMPAK PENAMBAHAN IMPEDANSI PADA KUMPARAN
TRANSFORMATOR DAYA TERHADAP FERORESONANSI
DI SALURAN TRANSMISI 500 KV**

Charell Naufal Kiramindyo
NRP 2213100126

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**IMPACT OF IMPEDANCE ADDITION AT POWER
TRANSFORMER WINDING ON FERRORESONANCE IN
500 KV TRANSMISSION LINE**

Charell Naufal Kiramindyo
NRP 2213100126

Advisors

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Dampak Penambahan Impedansi pada Kumparan Transformator Daya terhadap Feroresonansi di Saluran Transmisi 500 kV**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Charell Naufal Kirmaindyo
NRP. 2213100126

**DAMPAK PENAMBAHAN IMPEDANSI PADA KUMPARAN
TRANSFORMATOR DAYA TERHADAP FERORESONANSI DI
SALURAN TRANSMISI 500 KV**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Eng. I Made Yulistya N., ST., M. Sc.

NIP.19700712 199802 1 001

IGN Satriyadi H., ST., MT.

NIP.19730123 200212 1 001



DAMPAK PENAMBAHAN IMPEDANSI PADA KUMPARAN TRANSFORMATOR DAYA TERHADAP FERORESONANSI DI SALURAN TRANSMISI 500 KV

Charell Naufal Kiramindyo
2213100126

Dosen Pembimbing 1 : Dr.Eng I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Dosen Pembimbing 2 : IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

ABSTRAK

Fenomena feroresonansi merupakan sebuah fenomena transien yang terjadi diakibatkan adanya sebuah hubungan antara induktor non-linear yaitu dari inti besi transformator dengan kapasitor yang terdapat pada saluran transmisi. Fenomena feroresonansi dapat terjadi karena adanya gangguan dari *switching*. Dalam studi ini dilakukan penambahan impedansi pada kumparan transformator daya terhadap feroresonansi yang terjadi akibat gangguan *switching* yang dimodelkan pada perangkat lunak ATP Draw. Hasil dari simulasi menunjukkan dengan penambahan kapasitor shunt dengan rentang 40 – 80 nF, kapasitor sekunder dengan rentang 3 – 5 MVAR serta resistive load bank dengan rentang 0.3 – 1 MW dapat memitigasi fenomena feroresonansi.

Kata Kunci : Feroresonansi, Mitigasi Feroresonansi, Impedansi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

IMPACT OF IMPEDANCE ADDITION AT POWER TRANSFORMER WINDING ON FERRORESONANCE IN 500 KV TRANSMISSION LINE

Charell Naufal Kiramindyo
2213100126

1st Advisor : Dr.Eng I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

ABSTRACT

Ferroresonance phenomenon is a transient phenomenon that occurs due to a relationship between non-linear inductor that is from iron core transformer with a capacitor that is from transmission line. The phenomenon of ferroresonance can occur due to interference from switching. In this study to determine the impact of the addition of impedance on the power transformer coil to the ferroresonance caused by switching disturbance modeled on the ATP Draw software. The results of the simulation shows that with the addition of impedance that consist of shunt capacitor with range 40 - 80 nF, secondary capacitor with range 3 - 5 MVAR and resistive load bank with range 0.3 - 1 MW can mitigate ferroresonance phenomenon.

Keywords : Ferroresonance, Ferroresonance Mitigation, Impedance

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.

Tugas Akhir yang berjudul **“Dampak penambahan Impedansi terhadap Feroresonansi pada kumparan Transformator Daya di Saluran Transmisi 500 kV.”** ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara serta Bapak I Gusti Ngurah Satryadi Hernanda atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Orang tua penulis, Harry Purwanto dan Melly Elvira dan keluarga penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa serta selalu mengingatkan kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Fairuzal Khalisha Haf yang selalu mengingatkan, memberikan doa dan memberikan semangat sehingga tersesainya buku ini.
4. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
5. Krishanti Andarini dan Dio Randa Damara yang berjuang bersama dan saling membantu serta mas Wahyudi yang memberikan arahan dengan Tugas Akhir.
6. Teman-teman Eclus (Elektro Cepat Lulus) yang selalu memberikan semangat, mengingatkan, membantu dan doa sehingga buku ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.
7. Teman-teman Elektro ITS Angkatan 2013 (e53) yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman 1B/9B yang selalu memberikan motivasi sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan.
9. Teman-teman dan sahabat-sahabat saya yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu yang telah membantu saya hingga buku ini bisa terselesaikan.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
TABLE OF CONTENTS	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2

BAB 2 SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR

2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik	3
2.2 Transformator	6
2.2.1 Konstruksi Transformator	6
2.2.2 Transformator Ideal	8
2.2.3 Transformator Tidak Ideal	8
2.2.4 Kurva Histeresis	9
2.2.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator	10
2.2.6 Parameter Transformator	12

BAB 3 FERORESONANSI DAN ATP DRAW

3.1 Resonansi	15
3.2 Feroresonansi	16
3.2.1 Pengertian Feroresonansi	16
3.2.2 Klasifikasi Feroresonansi	18
3.2.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi	20
3.2.4 Mitigasi Feroresonansi	21
3.2.4.1 Mitigasi Feroresonansi dengan Penambahan Impedansi	21
3.3 ATP Draw	22

BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI

4.1	Pemodelan Rangkaian Feroresonansi	25
4.2	Simulasi Feroresonansi	28
4.2.1	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter C_g	28
4.2.2	Feroresonansi dengan Mengubah Parameter C_{sh}	31
4.3	Mitigasi Feroresonansi.....	33
4.3.1	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Shunt Akibat Perubahan C_g	33
4.3.2	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Sekunder Akibat Perubahan C_g	36
4.3.3	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Resistor Load Bank Akibat Perubahan C_g	39
4.3.4	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Shunt Akibat Perubahan C_{sh}	43
4.3.5	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Sekunder Akibat Perubahan C_{sh}	46
4.3.6	Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Resistor Load Bank Akibat Perubahan C_{sh}	49

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53

DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	57
BIOGRAFI	59

TABLE OF CONTENTS

TITLE PAGE

AUTHENTICITY STATEMENT

VALIDATION PAGE

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
PREFACE.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
TABLE OF CONTENTS.....	ix
FIGURE CONTENT	xi
TABLE CONTENT	xv

CHAPTER 1 INTRODUCTION

1.1 Background	1
1.2 Systematic of Report Writing	2

CHAPTER 2 ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEM AND TRANSFORMER

2.1 Electric Power Transmission System.....	3
2.2 Transformer.....	6
2.2.1 Transformer Construction.....	6
2.2.2 Ideal Transformer	8
2.2.3 Non Ideal Transformer	8
2.2.4 Hysteresis Curve	9
2.2.5 Transformer Equivalent Circuit.....	10
2.2.6 Transformer Parameter	12

CHAPTER 3 FERRORESONANCE AND ATP DRAW

3.1 Resonance	15
3.2 Ferroresonance	16
3.2.1 Definition of Ferroresonance	16
3.2.2 Ferroresonance Classification.....	18
3.2.3 Ferroresonance Modelling	20
3.2.4 Ferroresonance Mitigation	21
3.2.4.1 Ferroresonance Mitigation with Adding Impedance	21
3.3 ATP DRAW	22

CHAPTER 4 SIMULATION MITIGATION FERRORESONANCE ANALYSIS RESULT

4.1	Ferroresonance Modelling	25
4.2	Ferroresonance Simulation	28
4.2.1	Ferroresonance with Changing C_g Parameter	28
4.2.2	Ferroresonance with Changing C_{sh} Parameter	31
4.3	Ferroresonance Mitigation.....	33
4.3.1	Ferroresonance Mitigation with Adding Shunt Capacitor due to change of C_g	33
4.3.2	Ferroresonance Mitigation with Adding Secondary Capacitor due to change of C_g	36
4.3.3	Ferroresonance Mitigation with Adding Resistive Load Bank due to change of C_g	39
4.3.4	Ferroresonance Mitigation with Adding Shunt Capacitor due to change of C_{sh}	43
4.3.5	Ferroresonance Mitigation with Adding Secondary Capacitor due to change of C_{sh}	46
4.3.6	Ferroresonance Mitigation with Adding Resistive Load Bank due to change of C_{sh}	49

CHAPTER 5 CLOSING

5.1	Conclusion	53
5.2	Advice.....	53

BIBLIOGRAPHY	55
---------------------------	-----------

ENCLOSURE	57
------------------------	-----------

BIOGRAPHY.....	59
-----------------------	-----------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Single Line Diagram sistem tenaga listrik	3
Gambar 2.2	Transformator tipe inti	7
Gambar 2.3	Transformator tipe cangkang	7
Gambar 2.4	Kurva Histeresis.....	10
Gambar 2.5	Rangkaian ekivalen transformator	11
Gambar 2.6	Pengukuran transformator hubung terbuka	13
Gambar 2.7	Pengukuran transformator hubung singkat	13
Gambar 3.1	(a) Rangkaian resonansi seri (b) Kurva hubungan arus dan frekuensi resonansi.....	16
Gambar 3.2	Rangkaian pemodelan feroresonansi	17
Gambar 3.3	<i>Fundamental Mode</i>	19
Gambar 3.4	<i>Subharmonic Mode</i>	19
Gambar 3.5	<i>Quasi-periodic mode</i>	20
Gambar 3.6	<i>Chaotic Mode</i>	20
Gambar 3.7	Pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATP Draw	21
Gambar 3.8	Mitigasi feroresonansi dengan penambahan kapasitor shunt pada sisi primer dari transformator daya	22
Gambar 3.9	Mitigasi feroresonansi dengan penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.....	22
Gambar 3.10	Mitigasi feroresonansi dengan penambahan resisitive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya ...	22
Gambar 4.1	Single Line Diagram Sistem Transmisi 500 kV	25
Gambar 4.2	Rangkaian Ekivalen Feroresonansi Reduksi	25
Gambar 4.3	Rangkaian Simulasi Feroresonansi	26
Gambar 4.4	Kurva Magnetisasi Induktansi Nonlinier	28
Gambar 4.5	Rangkaian Feroresonansi dengan mengubah parameter C_g	28
Gambar 4.6	Respon tegangan pada sisi primer saat C_g bernilai (a) 0.001 μF (b) 0.01 μF (c) 0.1 μF (d) 1 μF (e) 10 μF	30
Gambar 4.7	Rangkaian Feroresonansi dengan mengubah parameter C_{sh}	31
Gambar 4.8	Respon tegangan pada sisi primer saat C_{sh} bernilai (a) 0.001 μF (b) 0.01 μF (c) 0.1 μF (d) 1 μF (e) 10 μF	32
Gambar 4.9	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer akibat kapasitansi C_g .	33

Gambar 4.10	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt pada sisi primer sebesar 20 nF.....	34
Gambar 4.11	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 60 nF pada sisi primer	35
Gambar 4.12	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt pada sisi primer sebesar 60 nF.....	36
Gambar 4.13	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 40 nF pada sisi primer	36
Gambar 4.14	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_g	37
Gambar 4.15	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 0.5 MVAR pada sisi sekunder.....	37
Gambar 4.16	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.....	38
Gambar 4.17	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 1 MVAR pada sisi sekunder.....	39
Gambar 4.18	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.....	39
Gambar 4.19	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_g	40

Gambar 4.20	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar $0.1 MW$ pada sisi sekunder	41
Gambar 4.21	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar $0.5 MW$ pada sisi sekunder	41
Gambar 4.22	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar $0.1 MW$ pada sisi sekunder	42
Gambar 4.23	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar $0.5 MW$ pada sisi sekunder	42
Gambar 4.24	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer akibat C_{sh}	43
Gambar 4.25	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar $20 nF$ pada sisi primer	44
Gambar 4.26	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor shunt sebesar $80 nF$ pada sisi primer.	44
Gambar 4.27	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor shunt sebesar $20 nF$ pada sisi primer	45
Gambar 4.28	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor shunt sebesar $40 nF$ pada sisi primer	45
Gambar 4.29	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_{sh}	46

Gambar 4.30	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 0.5 MVAR pada sisi sekunder.....	47
Gambar 4.31	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.....	47
Gambar 4.32	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 1 MVAR pada sisi sekunder.....	48
Gambar 4.33	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.....	48
Gambar 4.34	Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_{sh}	49
Gambar 4.35	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.....	50
Gambar 4.36	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.5 MW pada sisi sekunder.....	50
Gambar 4.37	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.....	51
Gambar 4.38	Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 1 MW pada sisi sekunder.....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Parameter Transformator Daya	27
Tabel 4.2	Efek perubahan nilai C_g	30
Tabel 4.3	Efek perubahan nilai C_{sh}	33
Tabel 4.4	Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF	34
Tabel 4.5	Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF	35
Tabel 4.6	Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF	37
Tabel 4.7	Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF	38
Tabel 4.8	Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF	40
Tabel 4.9	Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF	41
Tabel 4.10	Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF	43
Tabel 4.11	Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF	45
Tabel 4.12	Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF	46
Tabel 4.13	Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF	48
Tabel 4.14	Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.001 μF	49

Tabel 4.15	Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan Csh sebesar 0.01 μF	51
------------	---	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi listrik di masa kini sangatlah penting. Kegunaan dari energi listrik sendiri dimanfaatkan pada aktifitas yang dilakukan oleh masyarakat sehari-hari. Untuk mendapatkan energi listrik tersebut dibutuhkan sebuah transmisi panjang dari tempat pembangkitan energi menuju ke tempat masing-masing. Dalam penyalurannya dibutuhkan sebuah transformator yang dapat menaikkan tegangan dari pembangkit dan menurunkannya kembali saat ingin didistribusikan sehingga dapat digunakan. Diharapkan transformator itu sendiri dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan. Dan tidak terdapat kerusakan yang dapat mengganggu keandalan dari transformator tersebut.

Transformator Daya merupakan salah satu transformator yang dapat menaikkan tegangan dan menurunkan tegangan. Dalam penggunaan transformator daya terdapat sebuah fenomena yang dapat mengakibatkan keandalan dari transformator daya terganggu bahkan bisa membuat transformator daya tersebut rusak. Fenomena feroresonansi merupakan salah satu fenomena yang dapat menyebabkan kerusakan pada transformator daya. Feroresonansi mengakibatkan *overvoltage* dan *overcurrent* serta harmonisa yang tidak normal sehingga sangat berbahaya bagi peralatan [1]. Feroresonansi dapat terjadi disebabkan oleh induktor non-linear serta kapasitor di sebuah rangkaian listrik yang mempunyai nilai rugi-rugi yang kecil [2]. Fenomena feroresonansi salah satunya disebabkan oleh *switching* akibat pengoperasian pada *circuit breaker*.

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mengurangi fenomena feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan melakukan simulasi pada pemodelan sebuah rangkaian feroreosnansi yang terjadi di peralatan transformator pada gardu induk 500 kV. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis pengaruh nilai-nilai impedansi yaitu kapasitor serta resistor yang dapat mengurangi dampak pada fenomena feroresonansi yang disebabkan oleh *switching* akibat pengoperasian pada *circuit breaker*.

Tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mengevaluasi rentang nilai impedansi yaitu kapasitor serta resistor yang dapat mengurangi gangguan yang disebabkan oleh fenomena feroresonansi.

Metode yang digunakan untuk studi ini adalah melakukan studi literature serta pengumpulan data mengenai feroresonansi serta metode umum yang biasa digunakan untuk melakuka analisa. Kemudian menentukan parameter dari komponen yang akan digunakan dalam pemodelan rangkaian seperti parameter saluran transmisi, transformator daya, kapasitansi *circuit breaker*, dan sebagainya. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan simulasi menggunakan perngkat lunak ATP Draw lalu langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi pemodelan rangkaian. Hasil dari simulasi yaitu berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu. Hasil dari simulasi inilah yang digunakan untuk menganalisa dan dapat ditarik kesimpulan untuk studi ini.

1.2 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan buku Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bagian. Dalam bab 1 berisikan pendahuluan yang mengandung latar belakan, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, serta relevansi yang dicapai dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.

Dalam bab 2 berisikan tentang teori-teori yang menunjang, bersangkutan dengan sistem transmisi tenaga listrik serta transformator.

Dalam bab 3 berisikan teori-teori dasar mengenai fenomena feroresonansi serta mengenai ATP Draw.

Dalam bab 4 berisikan simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi berdasarkan parameter gangguan yang telah ditetapkan serta penambahan impedansi dalam pemodelan rangkaian feroresonansi agar dapat berdampak pada fenomena feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATP Draw.

Dan yang terakhir, dalam bab 5 berisikan kesimpulan yang dapat diambil dan saran yang bersangkutan dengan Tugas Akhir yang telah dilakukan.

BAB 2

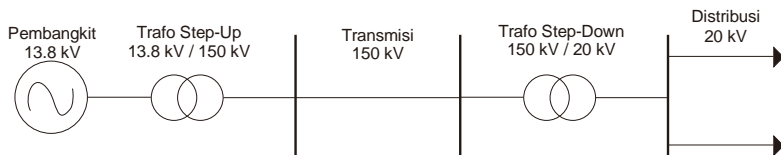
SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR

2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Kebutuhan akan daya listrik sangat penting dalam kehidupan masyarakat serta dalam pengembangan berbagai sektor utamanya dalam sektor ekonomi. Ekonomi modern saat ini sangat tergantung pada listrik dalam penggunaan untuk kehidupan. Hal ini menyebabkan peningkatan humlah pembangkit listrik dan kapasitas, akibatnya pada saluran transmisi yang menghubungkan pada pembangkit ke pusat-pusat beban akan meningkat.

Sistem tenaga listrik secara luas yang saling berhubungan, perlu sistem interkoneksi karena selain pengiriman melalui saluran transmisi terdapat pembangkit listrik di mana komposisi energi per jenis pembangkit listrik dan pusat-pusat beban untuk meminimalkan total kapasitas daya dan biaya. Transmisi interkonesi memungkinkan mengambil keuntungan dari keragaman beban, ketersediaan sumber dan harga untuk pasokan listrik ke beban dengan biaya minimum dengan keandalan yang dibutuhkan.

Tingginya kebutuhan akan tenaga listrik tersebut, maka dibutuhkan suatu sistem pengelolaan energi listrik. Energi listrik tersebut dapat dimanfaatkan secara maksimal guna memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi listrik saat ini maupu di masa yang akan datang. Dalam sistem tenaga listrik terdiri dari sistem pembangkit, sistem transmisi dan sistem distribusi. Secara umum, dalam sistem pembangkitan dan sistem transmisi merupakan sistem kelistrikan dalam skala besar, sedangkan distribusi merupakan tujuan akhir yang berarti untuk mentransmisikan daya listrik sampai pada akhir tujuan tersebut yaitu pada konsumen atau beban.



Gambar 2.1 Single Line Diagram sistem tenaga listrik

Tegangan yang digunakan dalam penyaluran energi listrik dari pembangkit listrik ke beban atau konsumen dengan menggunakan saluran transmisi adalah 500 kV untuk tingkat tegangan ekstra tinggi, 150 kV untuk tegangan tinggi. Untuk tingkat tegangan menengah digunakan 20 kV sebagai penyaluran dengan menggunakan saluran distribusi. Sedangkan untuk penyaluran ke beban atau konsumen digunakan tingkat tegangan rendah yaitu sebesar 380/220 V.

Pada tiap-tiap tingkat tegangan yang berbeda-beda terdapat sebuah gardu induk, dimana gardu induk tersebut merupakan sebuah tempat dimana digunakan untuk menaikkan tegangan ke tingkat tegangan tertentu yang biasanya digunakan pada tingkat tegangan tinggi dan tingkat tegangan menengah serta menurunkannya ke tingkat tegangan tertentu.

Untuk menyalurkan energi listrik, sebagai fungsi utamanya sistem transmisi tenaga listrik merupakan sistem yang sangat penting. Sistem transmisi tenaga listrik dari pusat pembangkit sampai dengan sistem distribusi menyalurkan energi listrik melalui sebuah media hantar. Konduktor yang digunakan sebagai media hantar, mempunyai keragaman sesuai dengan kondisi pada sistem transmisinya. Tingkat tegangan yang dialirkan pada sistem transmisi terdapat pada tingkat tegangan tinggi dan tingkat tegangan ekstra tinggi. Tingkat tegangan yang tinggi dan ekstra tinggi tersebut dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi *drop* tegangan yang terjadi pada saluran. Hubungan antara tegangan dan arus dijelaskan pada persamaan berikut :

$$V = I \times R \quad (2.1)$$

Dimana :

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

R = Tahanan (Ohm)

Jika nilai tegangan yang semakin meningkat dengan hambatan yang tetap maka akan didapatkan nilai arus yang semakin kecil. Nilai arus (I) yang kecil ini mempengaruhi rugi-rugi daya yang terdapat pada sistem transmisi. Rugi-rugi daya pada sistem transmisi dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut.

$$P = I^2 R \quad (2.2)$$

Dimana :

P = Rugi-rugi daya (Watt)

I = Arus (Ampere)

R = Hambatan (Ohm)

Dengan tingkat tegangan yang tinggi dapat memperkecil arus sehingga rugi-rugi daya pada saluran transmisi menjadi kecil. Semakin besar tingkat tegangan yang digunakan maka daya yang hilang akan semakin kecil akibat dari arus yang juga semakin kecil.

Parameter yang mempengaruhi dari sistem kerja suatu saluran terdapat pada resistansi, kapasitansi, induktansi serta konduktansi yang terdapat pada saluran transmisi tersebut.

1. Resistansi

Setiap kawat penghantar mempunyai nilai resistansi yang terdapat pada saluran transmisi berpengaruh terhadap rugi-rugi daya. Persamaan dibawah ini menjabarkan nilai pada resistansi:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \text{ Ohm} \quad (2.3)$$

Dimana:

ρ = Resistivitas penghantar (Ohm m)

ℓ = Panjang (m)

A = Luas penampang (m^2)

Untuk menghitung besaran resistansi pada kawat penghantar digunakan persamaan diatas. Semakin besar resistivitas penghantarnya serta semakin panjang dari kawat penghantar tersebut didapatkan resistansi yang besar pula. Akan tetapi ketika arus bolak balik mengalir pada konduktor, kerapatan arus pada konduktor terdistribusi secara tidak merata karena cenderung menuju ke bagian luar penampang.

2. Kapasitansi

Kapasitansi merupakan perbedaan potensial penghantar dengan tanah atau perbedaan potensial antar penghantar yang terjadi pada sebuah saluran transmisi. Kapasitansi antara penghantar sejajar nilainya bergantung terhadap ukuran serta jarak pemisah antar penghantar. Persamaan 2.5 menerangkan mengenai nilai kapasitansi antara kawat penghantar dengan tanah.

$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2h}{r}} \mu\text{F}/\text{km} \quad (2.4)$$

Dimana:

h = Jarak antara kawat penghantar dengan tanah (m)

r = Radius konduktor (cm)

3. Induktansi

Pada suatu kawat penghantar yang dialirkan arus yang berubah-ubah terhadap waktu maka akan timbul medan magnet, saat medan magnet dengan permeabilitas yang konstan maka fluks magnet akan berbanding lurus dengan arus sehingga tegangan pada induktansi berbanding lurus dengan perubahan arus terhadap waktu

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

Dimana:

e = Tegangan (V)

L = Induktansi rangkaian (H)

$\frac{di}{dt}$ = Kecepatan perubahan arus (A/s)

4. Konduktansi

Konduktansi terjadi ketika terdapat arus yang mengalir pada sebuah isolator atau permukaan kawat (arus bocor) yang disebabkan oleh adanya daya yang hilang akibat dari dielektrik yang digunakan. Nilai konduktansi dapat diabaikan dikarenakan arus bocor pada isolator sauran udara memiliki nilai yang kecil.

2.2 Transformator[3]

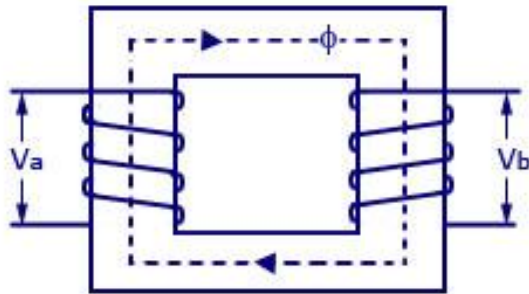
Transformator merupakan sebuah peralatan tenaga listrik yang mengubah sumber tegangan AC dengan tingkat tegangan tertentu menuju sumber tegangan AC dengan tingkat tegangan tertentu dengan melalui penerapan dari medan magnet. Transformator tersebut terdiri dari dua atau lebih kumparan yang mengelilingi sebuah inti dengan berbahan feromagnetik. Kumparan tersebut tidak terhubung langsung satu sama lain.

Kegunaan dari transformator sangatlah penting untuk penyaluran daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik. Dalam sistem tenaga listrik seperti transmisi, distribusi juga pada gardu induk membutuhkan transformator. Dengan fungsi utama dari transformator untuk mengubah tingkat tegangan tertentu menjadi ke tingkat tegangan tertentu sesuai yang diinginkan.

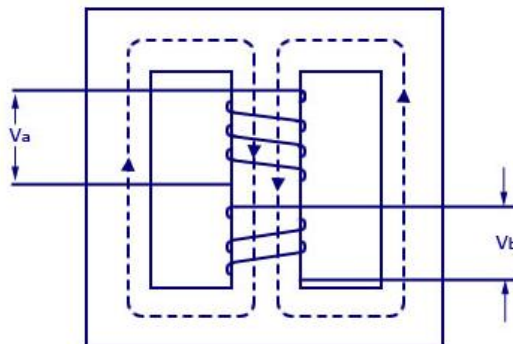
2.2.1 Konstruksi Transformator

Transformator yang berintikan besi tersebut mempunyai dua jenis konstruksi yang umumnya digunakan dalam sistem kelistrikan, yaitu

transformator dengan tipe inti (*core-form*) dan transformator dengan tipe cangkang (*shell-form*). Pada transformator dengan tipe inti (*core-form*), belitan yang mengelilingi inti berada pada kedua lengan dari sebuah inti besi yang berbentuk seperti segi empat. Belitan tersebut terdiri dari 2 bagian, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang berada pada tiap sisi lengan transformator yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Sementara belitan yang mengelilingi bagian lengan tengah dari sebuah inti besi yang mempunyai tiga lengan merupakan transformator dengan konstruksi yang bertipe cangkang (*shell-form*). Pada konstruksi dengan tipe cangkang, kumparan primer dan kumparan sekunder mengelilingi inti besi yang berada pada tengah lengan dari inti besi dan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Transformator tipe inti



Gambar 2.3 Transformator tipe cangkang

2.2.2 Transformator Ideal

Transformator ideal merupakan transformator yang mengkonversikan energi yang terdapat pada sisi primer menuju pada sisi sekunder tanpa adanya rugi-rugi (*losses*) sehingga energi yang dikonversikan tidak berubah menjadi energi lain. Pada pengaplikasiannya transformator ideal tidak bisa direalisasikan dikarenakan terdapat banyak rugi-rugi yang terjadi akibat dari transformator tersebut. Resistansi pada belitan diabaikan, fluks bocor diabaikan, tidak terdapat rugi inti, serta permeabilitas dari inti besi sangat tinggi sehingga diasumsikan bahwa efisiensi dari transformator tersebut adalah 100 persen.

Dari asumsi tersebut gaya gerak listrik yang dihasilkan pada sisi primer dari transformator ideal berbanding lurus dengan jumlah belitan terhadap perubahan fluks terhadap waktu. Dapat dilihat pada persamaan 2.6

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

Pada belitan sekunder gaya gerak listrik yang didapatkan dari hasil fluks yang mengalir melalui inti besi dari belitan primer.

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Maka dengan asumsi transformator yang ideal sehingga fluks yang dihasilkan pada belitan primer sama dengan fluks yang dihasilkan pada belitan sekunder didapatkan persamaan 2.8

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.8)$$

Dimana:

- e = GGL induksi (Volt)
- N = Jumlah lilitan
- d ϕ = Perubahan fluks (Weber)
- dt = Perubahan waktu (s)

2.2.3 Transformator Tidak Ideal

Realitanya penggunaan dari peralatan listrik tidak pernah mencapai kemampuan maksimumnya. Terlebih pada transformator yang mempunyai banyak faktor yang membuat kemampuannya tidak

maksimal. Faktor-faktor tersebut terdapat pada resistansi pada belitan, fluks yang bocor, permeabilitas dari intinya sendiri dan masih banyak hal lainnya. Fluks yang dihasilkan dari kumparan yang satu tidak sepenuhnya menuju ke kumparan yang lainnya. Terdapat fluks yang mengalir ke luar kumparan. Fluks yang hilang tersebut adalah fluks bocor. Resistansi pada inti dan reaktansi magnetik juga ikut menambahkan kerugian pada transformator. Permeabilitas pada inti yang terbatas yang terdapat pada transformator mempengaruhi nilai arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet untuk mempertahankan fluks yang dibutuhkan pada transformator. Arus dan gaya gerak magnet yang dibutuhkan sebanding dengan kerapatan fluks (B) yang terjadi pada inti transformator. Pernyataan tersebut berdasarkan pada persamaan,

$$B = \mu H = \frac{\Phi}{A} \quad (2.9)$$

Nilai H didapatkan dari,

$$H = \frac{Ni}{\ell} \quad (2.10)$$

Sehingga

$$\Phi = \int B \cdot ds = A\mu \frac{Ni}{\ell} \quad (2.11)$$

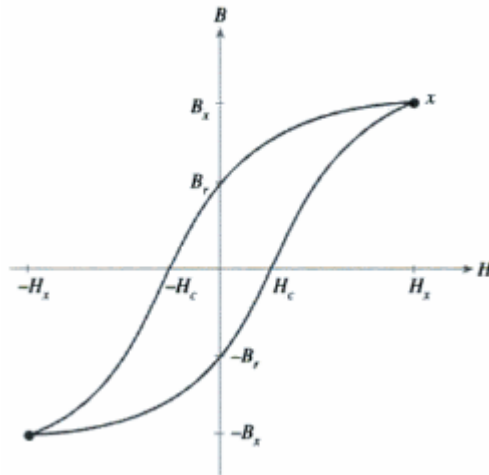
Dimana:

- B = Kerapatan fluks (Wb/m^2)
- μ = Permeabilitas
- H = Intensitas medan magnet (At/m)
- Φ = Fluks (Wb)
- A = Luas permukaan (m^2)
- N = Jumlah lilitan
- i = Ampere (A)

2.2.4 Kurva Histeresis

Di dalam sebuah transformator terdapat sebuah inti besi yang memiliki kurva kerjanya dikarenakan dari bahan inti besi tersebut yang

mempengaruhi kurva kinerjanya. Dalam kurvanya dilihat pada kerapatan fluks terhadap intensitas medan magnet.

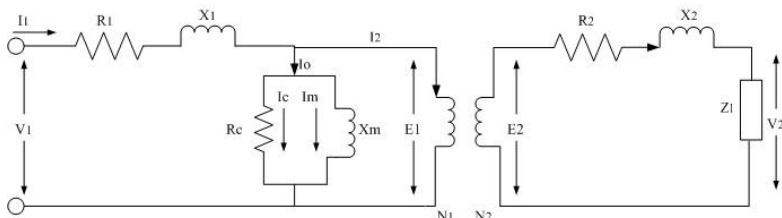


Gambar 2.4 Kurva Histeresis [4]

Ketika diberi gaya gerak magnetik pada inti besi, kerapatan fluks akan naik namun tidak secara linier. Setelah mencapai titik maksimumnya, kerapatan fluks akan bersaturasi. Setelah saturasi ketika nilai dari intensitas medan magnet dikecilkan hingga bernilai 0, nilai dari kerapatan fluks tidak seperti saat dinaikkan nilai intensitas medan magnetnya. Hal tersebut terjadi karena terdapat sisa kerapatan fluks pada bahan tersebut. Dan setelah nilai intensitas medan magnet dinaikkan kembali dan menurunkannya kembali hingga mencapai nilai 0 dan mengulangi hal tersebut berulang kali terbentuklah kurva histeresis seperti pada gambar 2.4

2.2.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Untuk memudahkan dalam menganalisa kerja sebuah transformator dapat dilakukan dengan membuat rangkaian ekuivalen dari sebuah transformator sesuai dengan kondisi transformator tersebut terlebih pada setiap kumparan dari sisi transformator tersebut dan juga pada inti dari transformator tersebut. Gambar 2.5 merupakan rangkaian ekuivalen dari sebuah transformator.



Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen transformator

Berdasarkan rangkaian ekivalen diatas maka diperoleh:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.12)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ atau } E_1 = aE_2 \quad (2.14)$$

Dari persamaan 2.13 dan 2.14 maka diperoleh :

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (2.15)$$

Dengan adanya persamaan :

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \text{ atau } I_2 = aI'_2 \quad (2.16)$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$E_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 \quad (2.17)$$

$$V_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.18)$$

Dengan penyederhanaan rangkaian, maka diperoleh :

$$R_{eq} = R_1 + (N_1/N_2)^2 \cdot R_2 \quad (2.19)$$

$$X_{eq} = X_1 + (N_1/N_2)^2 \cdot X_2 \quad (2.20)$$

Dimana :

V_1	= Tegangan primer (V)
V_2	= Tegangan sekunder (V)
E_1	= Ggl primer (V)
E_2	= Ggl sekunder (V)
R_1	= Hambatan primer (Ω)
R_2	= Hambatan sekunder (Ω)
I_1	= Arus primer (A)
I_2	= Arus sekunder (A)
X_1	= Reaktansi primer (Ω)
X_2	= Reaktansi sekunder (Ω)
N_1	= Jumlah lilitan primer
N_2	= Jumlah lilitan sekunder
Z_l	= Impedansi beban (Ω)
a	= Konstanta

2.2.6 Parameter Transformator

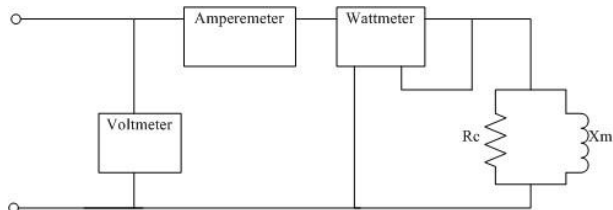
Untuk mendapatkan parameter yang terdapat pada rangkaian ekuivalen seperti nilai resistansi pada sisi primer, resistansi pada sisi sekunder, reaktansi pada sisi primer, reaktansi pada sisi sekunder, resistansi dan reaktansi pada inti dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran saat kondisi hubung terbuka (*open-circuit test*) dan melakukan pengukuran saat kondisi hubung singkat.

Pengukuran saat kondisi hubung terbuka (*open-circuit test*) digunakan untuk memperoleh nilai dari parameter inti, yaitu resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m). Saat kondisi hubung terbuka, tegangan V_p diberikan pada kumparan primer, maka hanya arus primer I_p yang mengalir dari pengukuran daya yang masuk (P_p). Dikarenakan nilai dari resistansi primer dan reaktansi primer jauh lebih kecil dibandingkan nilai pada resistansi dan reaktansi inti, maka nilai resistansi dan reaktansi primer pada pengukuran ini dapat diabaikan. Gambar 2.6 menjelaskan mengenai pengukuran transformator hubung terbuka.

Berdasarkan pengukuran transformator hubung terbuka pada gambar 2.6, maka diperoleh :

$$R_c = 1 / \left(\left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \right) \cos \theta \quad (2.21)$$

$$X_m = 1 / \left(\left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \right) \sin \theta \quad (2.22)$$



Gambar 2.6 Pengukuran transformator hubung terbuka

Dimana :

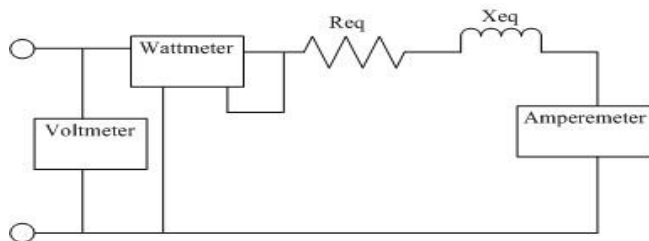
R_c = Resistansi inti (Ohm)

V_{oc} = Tegangan primer tanpa beban (Volt)

I_{oc} = Arus Primer tanpa beban (Ampere)

X_m = Reaktansi magnetisasi (Ohm)

Pengukuran saat kondisi hubung singkat (*short-circuit test*) digunakan untuk memperoleh nilai resistansi ekivalen (R_{eq}) dan nilai reaktansi ekivalen (X_{eq}). Saat kondisi hubung singkat dilakukan dengan menghubungkan sisi sekunder dengan impedansi yang bernilai hingga mendekati nol, sehingga hanya impedansi yang membatasi arus. Saat hubung singkat (*short-circuit test*) dilakukan, nilai tegangan yang diberikan harus bernilai kecil sebab nilai dari R_{eq} dan X_{eq} relatif kecil sehingga tidak melebihi arus nominal dari rating transformator. Tegangan di sisi sekunder pada pengukuran hubung singkat yang relatif kecil menyebabkan tegangan jatuh pada R_c dan X_m sangat kecil, sehingga nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu tegangan yang diperoleh merupakan tegangan pada impedansi antara resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen. Gambar 2.6 menjelaskan mengenai pengukuran transformator hubung singkat.



Gambar 2.7 Pengukuran transformator hubung singkat

Berdasarkan pengukuran transformator hubung singkat di atas, maka diperoleh :

$$R_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \cos\theta \quad (2.23)$$

$$X_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \sin\theta \quad (2.24)$$

Dimana :

R_{eq} = Resistansi ekivalen (Ohm)

X_{eq} = Reaktansi ekivalen (Ohm)

V_{sc} = Tegangan primer hubung singkat (Volt)

I_{sc} = Arus Primer hubung singkat (Ampere)

BAB 3

FERORESONANSI DAN ATP DRAW

3.1 Resonansi

Resonansi merupakan sebuah fenomena yang dapat terjadi pada sebuah sistem kelistrikan di semua tingkat tegangan. Hal ini yang mendasari agar dapat memahami fenomena feroresonansi. Pada sebuah rangkaian listrik yang terdapat unsur elemen kapasitor (C) dan induktor (L) dapat terjadi fenomena resonansi tersebut. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktornya dihubungkan secara seri sedangkan resonansi paralel terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktor (I) dihubungkan secara paralel.

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang disusun secara seri ketika frekuensi sumber diubah-ubah sehingga dapat terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.

$$X_L = X_C \quad (3.1)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi Induktif

X_C = Reaktansi Kapasitif

Dari pengertian tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa syarat terjadinya resonansi adalah:

$$LC\omega^2 n = 1 \quad (3.2)$$

Dimana:

L = induktor (Henry)

C = kapasitor (Farad)

ω_n = kecepatan sudut (Rad/s)

Sehingga ketika resonansi terjadi maka nilai impedansi rangkaian akan berubah dimana dalam persamaan ditulis:

$$Z = R + jX \quad (3.3)$$

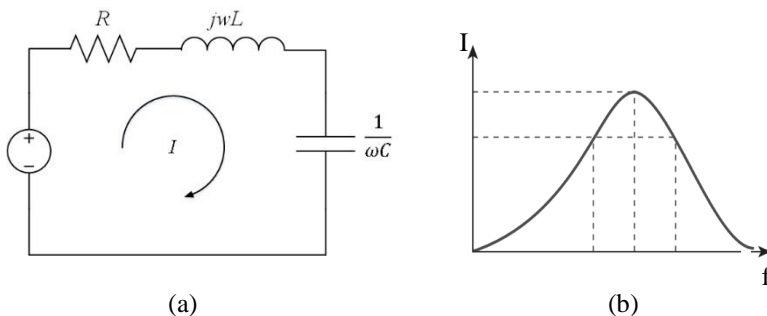
Dimana:

Z = Impedansi

R = Resistansi

X = Reaktansi

Dari persamaan 3.2 dan 3.3, ketika resonansi terjadi frekuensi sumber menjadi frekuensi resonansi maka nilai reaktansi akan menjadi nol. Nilai reaktansi yang sama dengan nol tersebut menyebabkan nilai impedansi mencapai nilai yang minimum. Saat nilai impedansi bernilai minimum maka nilai arus (I) akan mencapai maksimum. Dapat dilihat pada gambar 3.1 rangkaian resonansi seri dan kurva hubungan arus dan frekuensi resonansi.



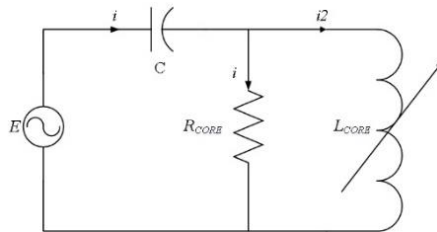
Gambar 3.1 (a) Rangkaian resonansi seri (b) Kurva hubungan arus dan frekuensi resonansi

3.2 Ferroresonansi

3.2.1 Pengertian Ferroresonansi

Ferroresonansi atau resonansi non-linier merupakan fenomena gangguan non-linier kompleks yang dapat menyebabkan tegangan lebih pada sistem tenaga listrik sehingga dapat membahayakan sistem transmisi, isolasi, sistem proteksi, peralatan serta operator. Apabila pada sistem terjadi gangguan kompleks yang tidak dapat dijelaskan secara spesifik, kemungkinan hal tersebut adalah gejala ferroresonansi. Pada tahun 1920 literatur pertama kali mengenai ferroresonansi yang menggambarkan osilasi yang muncul pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik tersebut mempunyai elemen-elemen yang setidaknya

terdapat elemen sumber tegangan sinusoidal, kapasitor serta induktansi non-linier. Nilai kapasitor didapatkan dari kapasitansi saluran, *grading* kapasitansi dan kapasitansi transformator. Sedangkan induktansi non-linier diperoleh akibat penggunaan transformator daya, transformator pengukur tegangan dan reaktor shunt pada sistem tenaga listrik.



Gambar 3.2 Rangkaian pemodelan feroresonansi

Untuk memudahkan dalam memahami feroresonansi pendekatan dengan menggunakan rangkaian resonansi seri. Pada rangkaian resonansi seri penggunaan induktor diganti menjadi induktor nonlinear sebagai pemodelan dari inti trafo sehingga rangkaianannya berubah dari rangkaian resonansi seri menjadi rangkaian feroresonansi. Fenomena yang terjadi pada rangkaian feroresonansi sama dengan pada rangkaian resonansi seri yang menimbulkan kenaikan arus yang sangat besar dikarenakan impedansi rangkaian yang kecil yang berakibat dari nilai reaktansi pada kapasitor sama dengan nilai reaktansi pada induktor non-linier. Ketika arus yang naik menyebabkan rapat fluks yang juga akan naik mencapai titik saturasi dan tidak lagi linear. Saat nilai arus yang naik pada inti trafo yang bersifat feromagnetik melalui titik saturasinya maka induktansi akan berubah sangat cepat sehingga terjadi interaksi antara kapasitor dan inti besi induktor akan menghasilkan tegangan dan arus yang tidak biasa. Gambar 3.2 merupakan rangkaian feroresonansi dengan induktor yang digantikan menggunakan induktor nonlinear.

Bahan feromagnetik yang terdapat pada inti transformator yang menyebabkan timbulnya ketidaklinieran pada induktansi yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi. Munculnya lebih dari satu respon *steady state* pada parameter jaringan yang sama menjadi penyebab utama dari feroresonansi. Respon yang berubah cepat dari suatu respon steady state normal menjadi respon steady state feroresonansi yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik.

Beberapa gejala yang timbul yang menunjukkan kehadiran feroresonansi pada sistem tenaga listrik antara lain :

1. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih.
2. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator.
3. Munculnya frekuensi-frekuensi harmonisa.

Gejala-gejala pada sistem tenaga listrik tersebut bisa berakibat dari pengisian daya trafo, *lightning overvoltage*, *switching*, gangguan transien lainnya dapat memicu fenomena feroresonansi[5].

Feroresonansi yang terjadi pada sistem kelistrikan umumnya muncul akibat dari sistem yang tidak seimbang. Misalnya pada *switching* yang menyebabkan sebuah komponen kapasitif terhubung seri dengan impedansi magnetisasi transformator. Kondisi ini menyebabkan tegangan lebih yang berpengaruh besar terjadinya gangguan pada transformator, kabel, maupun arrester. *Switching* yang terjadi merupakan gejala abnormal *switching* dimana dapat disebabkan oleh hal-hal berikut ini :

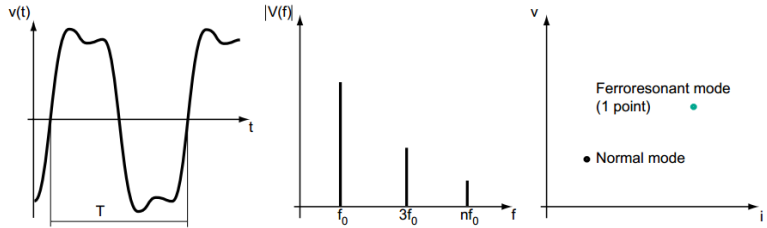
1. Kesalahan pada operator dimana saat *switching* menarik sebuah siku konektor secara manual.
2. Pengoperasian *fuse* ketika ada gangguan, yang menyebabkan *switch* terbuka.
3. Pengisian energi transformator secara manual
4. *Switching* kabel manual untuk rekonfigurasi sebuah rangkaian kabel pada saat kondisi darurat.

3.2.2 Klasifikasi Feroresonansi[6]

Berdasarkan pengalaman terbentuknya gelombang yang terdapat pada sistem tenaga listrik, percobaan untuk mengurangi pemodelan pada sistem tenaga listrik, dan simulasi yang berulang-ulang bisa didapatkan kesimpulan terdapat 4 klasifikasi feroresonansi. Klasifikasi feroresonansi dibagi menjadi 4 bentuk dari gelombang feroresonansi yaitu *Fundamental Mode*, *Subharmonic Mode*, *Quasi-periodic Mode* dan *Chaotic Mode*.

a. *Fundamental Mode*

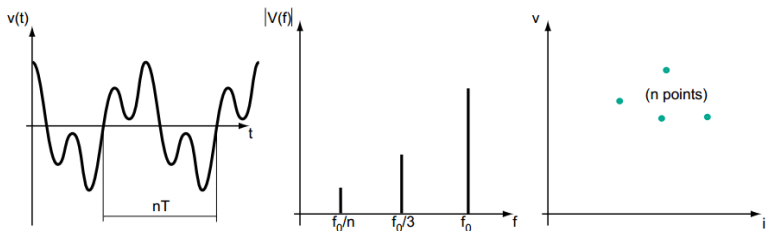
Fundamental Mode memiliki tegangan dan arus dengan periode yang sama dengan sistem dan dapat mengandung berbagai tingkat harmonisa. Spektrum sinyal merupakan *discontinuous spectrum* yang terbentuk dari frekuensi sistem (f_0) dan frekuensi harmonisa ($2f_0$, $3f_0$, ...). Gambar 3.3 merupakan bentuk dari *Fundamental Mode*



Gambar 3.3 Fundamental Mode

b. Subharmonic Mode

Sinyal ferroresonansi *Subharmonic Mode* memiliki periode nT yang merupakan kelipatan dari periode sumbernya. Keadaan ini disebut sebagai *subharmonic* atau *harmonic* $1/n$. Ferroresonansi dari *Subharmonic Mode* terdapat pada orde ganjil. Spektrumnya menunjukkan sinyal fundamentalnya sama dengan f_0/n dan juga pada harmonisanya. f_0 merupakan frekuensi sumber dan n merupakan bilangan bulat. Gambar 3.4 merupakan bentuk dari *Subharmonic Mode*.



Gambar 3.4 Subharmonic Mode

c. Quasi-periodic Mode

Pada sinyal ferroresonansi *Quasi-periodic Mode* atau bisa disebut juga sebagai *pseudo-periodic* tidak berperiodik. Spektrum sinyalnya merupakan *discontinuous* dimana frekuensinya dapat didefinisikan sebagai

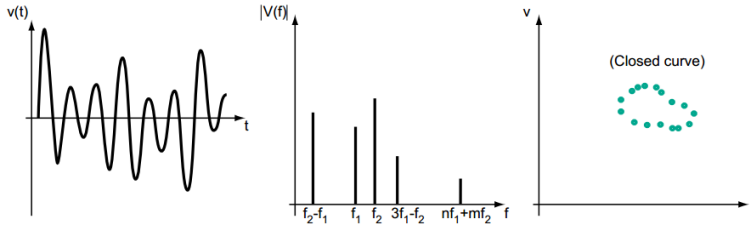
$$nf_1 + mf_2 \quad (2.9)$$

Dimana:

n = bilangan bulat

m = bilangan bulat

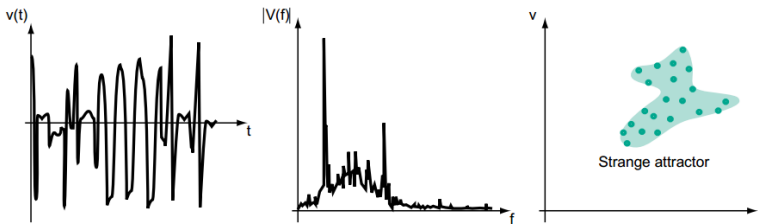
f_1 = bilangan riil irasional
 f_2 = bilangan riil irasional



Gambar 3.5 *Quasi-periodic mode*

d. *Chaotic Mode*

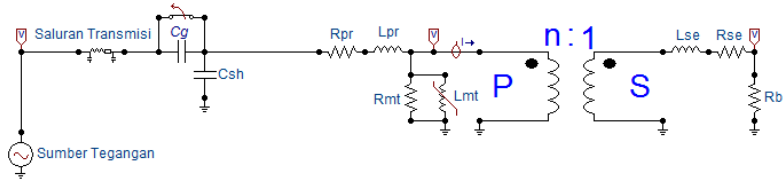
Spektrum pada *Chaotic Mode* adalah spectrum yang *continuous* dikarenakan tidak diinterupsi oleh frekuensi apapun serta bentuknya tidak teratur. Gambar 3.6 merupakan bentuk dari *Chaotic Mode*.



Gambar 3.6 *Chaotic Mode*

3.2.3 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Untuk memudahkan dalam mensimulasikan fenomena feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik dilakukan sebuah pemodelan rangkaian feroresonansi. Dalam studi ini feroresonansi yang disimulasikan terjadi pada kumparan transformator daya. Yang membuat terjadinya feroresonansi akibat gangguan yang terjadi ketika pengoperasian *switching*. Sehingga pada perangkat lunak ATP Draw dimodelkan dengan komponen-komponen utama yaitu saluran transmisi 500 kV, *switch* dan kumparan primer sekunder pada transformator daya.



Gambar 3.73 Pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATP Draw

3.2.4 Mitigasi Feroresonansi

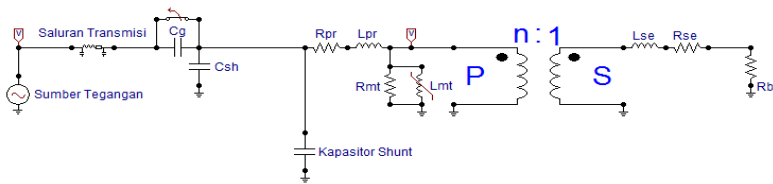
Untuk dapat mengurangi feroresonansi yang terjadi pada sebuah sistem tenaga listrik ataupun pada peralatan listrik yang diakibatkan dari pengisian daya trafo, *lightning overvoltage*, *switching*, gangguan transien lainnya dilakukan teknik mitigasi. Dalam CIGRE technical brochure no. 569, teknik mitigasi yang dapat dilakukan pada transformator daya dikelompokkan menjadi 3 dasar pendekatan[7]:

1. Hindari parameter rangkaian atau kondisi operasi yang dapat membuat feroresonansi
2. Meminimalisir transfer energi yang dapat membuat osilasi dari feroresonansi bertambah lama
3. Dengan mengatur durasi dari feroresonansi dengan cara pengoperasian pada *switching*

Dari pendekatan diatas maka didapatkan 4 cara teknik mitigasi agar dapat mengurangi feroresonansi pada transformator daya. Yaitu dengan penambahan kapasitas dari kapasitor shunt pada sisi primer dari transformator daya, perubahan karakteristik saturasi transformator dengan permeabilitas inti transformator yang mempunyai nilai fluks yang kecil, penambahan kapastior bank pada sisi sekunder dari transformator serta penambahan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator[8].

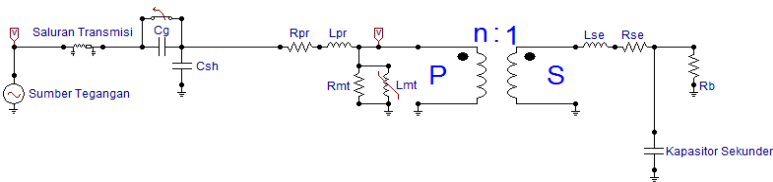
3.2.4.1 Mitigasi Feroresonansi dengan Penambahan Impedansi

Pada studi ini untuk mengurangi dampak dari feroresonansi yang terjadi akibat gangguan oleh pengoperasian *switching* dilakukan dengan teknik mitigasi dengan cara penambahan impedansi yaitu berupa kapasitor atau resistor. Pada gambar 3.8 merupakan teknik mitigasi dengan penambahan kapasitor pada sisi kumparan primer dari transformator daya.



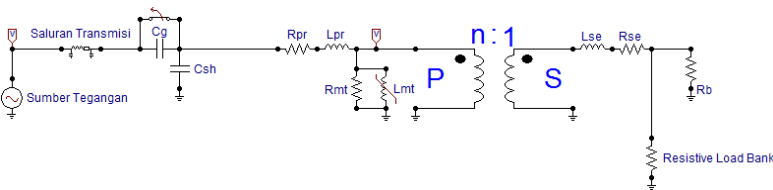
Gambar 3.84 Mitigasi ferroresonansi dengan penambahan kapasitor shunt pada sisi primer dari transformator daya

Pada gambar 3.9 merupakan mitigasi ferroresonansi dengan penambahan kapsitor sekunder yang dibuat paralel terhadap kumparan sisi sekunder transformator daya.



Gambar 3.95 Mitigasi ferroresonansi dengan penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya

Gambar 3.10 menunjukkan mitigasi ferroresonansi dengan menambahkan resistive load bank pada sisi sekunder yang dibuat seri dengan kumparan sisi sekunder transformator daya



Gambar 3.106 Mitigasi ferroresonansi dengan penambahan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya

3.3 ATP Draw

Perangkat yang digunakan untuk mensimulasikan dan memodelkan rangkaian ferroresonansi adalah perangkat lunak Alternative Transient Program (ATP). Perangkat lunak ATP merupakan perangkat lunak yang pemakaiannya paling luas untuk mensimulasikan mengenai peristiwa-

peristiwa transien. Perangkat lunak tersebut ditulis dengan bahasa Borland Delphi 2.0 serta dapat digunakan dan berjalan dengan normal pada operasi computer Windows 9x/NT/2000 XP. Pada perangkat lunak ATP Draw dapat dilakukan pemodelan rangkaian listrik dengan memilih komponen yang akan digunakan dari menu yang disediakan kemudian perangkat lunak ATP Draw menghasilkan file masukan dengan ekstensi ATP. Simulasi pada perangkat lunak ATP dan plot hasil pengolahan terintegrasi pada ATP Draw

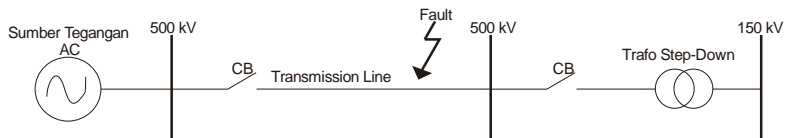
---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI MITIGASI FERORESONANSI

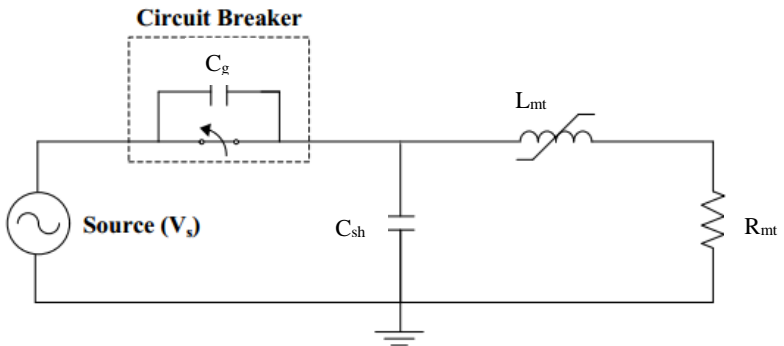
Sistem kelistrikan seperti pada sistem transmisi yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, dapat memungkinkan terjadinya feroresonansi. Simulasi dilakukan untuk mengetahui fenomena feroresonansi yang terjadi akibat gejala dari gangguan masih berada pada batas aman atau tidak.

Pada studi ini terjadi pada sistem transmisi sehingga dilakukan simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang diakibatkan dari pengoperasian *switching* sebuah *circuit breaker* seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 500 kV

Pemodelan yang digunakan seperti pada gambar 4.1 direduksi menjadi rangkaian ekivalen feroresonansi seperti pada gambar 4.2



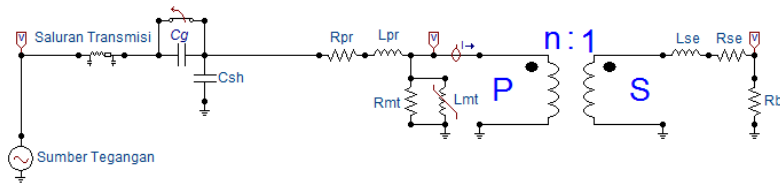
Gambar 4.2 Rangkaian Ekivalen Feroresonansi Reduksi [8]

4.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Dapat dilihat pada gambar 4.2 terdapat elemen-elemen seperti V_s , C_g , C_{sh} , L_{mt} dan R . C_g merupakan nilai kapasitif yang diakibatkan

pengoperasian *switching* sebuah *circuit breaker*. C_{sh} merupakan nilai kapasitif yang ditimbulkan oleh kapasitansi saluran transmisi. L_{non} merupakan pemodelan dari induktansi nonlinier yang terdapat pada inti transformator. Sementara R merupakan pemodelan terhadap rugi-rugi yang terdapat pada inti transformator.

Dari rangkaian ekivalen feroresonansi reduksi yang ditunjukkan pada gambar 4.2 maka dibuat pemodelan rangkaian feroresonansi pada perangkat lunak ATP Draw. Pemodelan rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi Feroresonansi

Sumber tegangan yang digunakan adalah sumber tegangan AC dengan tegangan rms *line-line* sebesar 500 kV dengan frekuensi 50 Hz. Dikarenakan objek yang diamati pada studi ini adalah tegangan satu fasa, maka besar nilai tegangan yang dibangkitkan adalah nilai tegangan rms *line-netral*. Besar tegangan *line-netral* yang digunakan:

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{500000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 288675 \text{ V}$$

Tegangan puncak *line-netral* (V_{L-peak}) dapat dihitung seperti berikut:

$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 288675 \times \sqrt{2} = 408248 \text{ V}$$

Saluran transmisi yang digunakan dalam perangkat lunak ATP Draw memiliki komponen berupa komponen resistif, induktif dan kapasitif dengan model yang digunakan adalah saluran *Lumped RLC-Pi 1 phase* serta diasumsikan saluran transmisi memiliki panjang saluran 5 km, dengan resistansi saluran sebesar 0,00001273 Ohm/m, induktansi saluran

sebesar 0,000937 mH/m, dan kapasitansi saluran sebesar 0,01274 $\mu\text{F/m}$ [9].

Pada studi ini dalam rangkaian simulasi feroresonansi diubah nilai parameter pada elemen C_g dan C_{sh} sehingga feroresonansi dapat terbangkitkan. Tujuan mengubah nilai dari parameter pada elemen C_g dan C_{sh} adalah untuk mengetahui dari jangka nilai berapa yang dapat membangkitkan feroresonansi. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi menggunakan komponen elemen yang terdapat pada perangkat lunak ATP Draw.

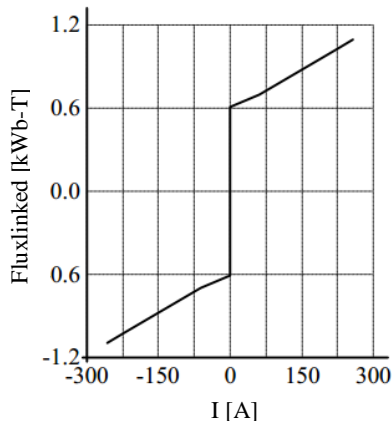
Transformator daya yang dimodelkan untuk membangkitkan feroresonansi dalam perangkat lunak ATP Draw ini memiliki kumparan primer, kumparan inti serta kumparan sekunder. Pada sisi kumparan primer terdiri dari resistansi primer yang dimodelkan dengan R_{pr} dan induktansi primer yang dimodelkan dengan L_{pr} . Kumparan inti memiliki resistansi magnetisasi yaitu R_{mt} dan induktansi non linier yaitu L_{mt} . Sedangkan kumparan sekunder terdiri dari resistansi sekunder yang dimodelkan dengan R_{se} dan induktansi sekunder yang dimodelkan dengan L_{se} . Serta terdapat resistansi burden yang dimodelkan pada perangkat lunak ATP draw dengan R_b .

Parameter dari transformator daya mulai dari R_{pr} , L_{pr} , R_{mt} , R_{se} , L_{se} , serta resistansi burden R_b dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Parameter Transformator Daya[10]

Parameter	Nilai
Resistansi primer (R_{pr})	12 Ω
Induktansi primer (L_{pr})	1.03 H
$R_{magnetisasi}$ (R_{mt})	3110000 Ω
Resistansi sekunder (R_{se})	0,0012 Ω
Induktansi sekunder (L_{se})	0.336 mH
Resistansi burden (R_b)	1375 Ω

Kurva magnetisasi induktansi nonlinier yang terdapat pada pemodelan rangkaian feroresonansi pada perangkat lunak ATP Draw terdapat pada gambar 4.4. Dimana pada sumbu x menunjukkan arusnya sedangkan dari sumbu y menunjukkan fluxnya. Terlihat dari gambar 4.4 bentuk non-linier dari kurva magnetisasi tersebut lebih curam yang menunjukkan bahwa bahan dari inti besi tersebut baik.

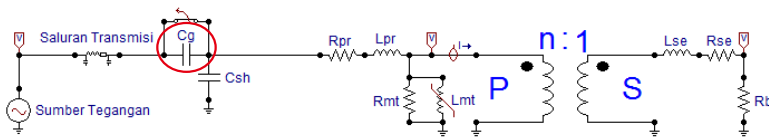


Gambar 4.4 Kurva Magnetisasi Induktansi Nonlinier[10]

4.2 Simulasi Ferroresonansi

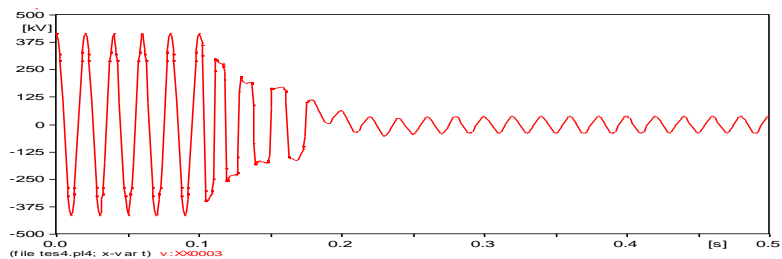
4.2.1 Ferroresonansi dengan Mengubah Parameter C_g

Ferroresonansi yang didapatkan dengan mengubah nilai kapasitif pada C_g di rangkaian ferroresonansi dengan rentang nilai kapasitif tertentu. C_g yang terdapat pada rangkaian ferroresonansi merupakan nilai kapasitif dari penggunaan *circuit breaker* sehingga nilai tersebut diperhitungkan dalam simulasi ini. Rangkaian simulasi ferroresonansi dapat dilihat pada gambar 4.5

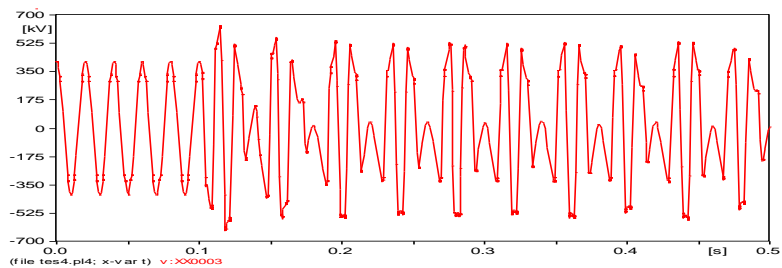


Gambar 4.5 Rangkaian Ferroresonansi dengan mengubah parameter C_g

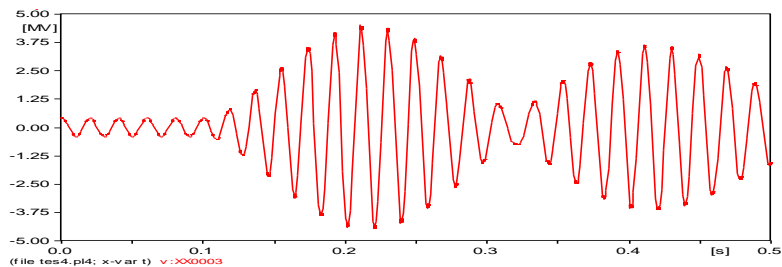
Pada simulasi ini nilai kapasitif C_g diubah-ubah dengan rentang nilai 0.001 – 10 μF . Dengan nilai C_{sh} yang dibuat tetap yaitu sebesar 97.4 nF. *Switch* akan dibuka pada saat $t = 0.1$ s. Simulasi rangkaian ferroresonansi akan dijalankan selama 0.5 s. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada sisi primer.



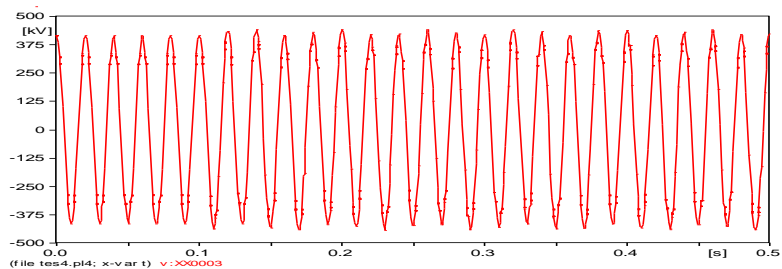
(a)



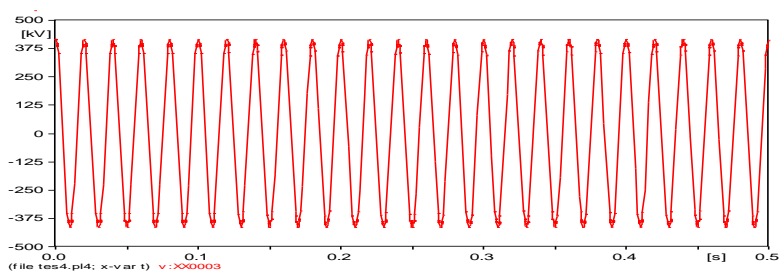
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.6 Respon tegangan pada sisi primer saat C_g bernilai (a) $0.001 \mu\text{F}$ (b) $0.01 \mu\text{F}$ (c) $0.1 \mu\text{F}$ (d) $1 \mu\text{F}$ (e) $10 \mu\text{F}$

Dari gambar 4.6 dapat dilihat bahwa masing-masing nilai kapasitansi yang memiliki rentang nilai yang berbeda-beda dapat menimbulkan ada tidaknya feroresonansi. Perbandingan nilai tegangan di sisi primer pada saat *switch* sebelum dibuka dan setelah dibuka dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Efek perubahan nilai C_g

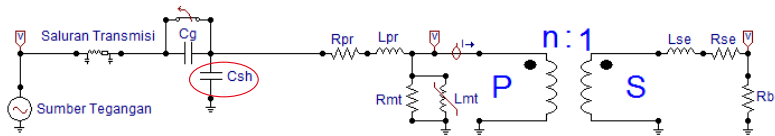
$C_g (\mu\text{F})$	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0,001	414.34	297.2	Tidak
0,01	414.34	631.93	Ya
0,1	414.34	4444.7	Ya
1	414.34	424.8	Tidak
10	414.34	414.9	Tidak

Dapat dilihat dari gambar 4.6 serta dari tabel 4.2 bahwa terdapat lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa saat nilai kapasitansi pada C_g bernilai sebesar $0.1 \mu\text{F}$ dan $0.01 \mu\text{F}$ saat *circuit breaker* dibuka pada saat $t = 0.1 \text{ s}$ sehingga respon tegangan terdapat harmonisa. Sedangkan ketika nilai kapasitansi pada C_g bernilai sebesar $0.001 \mu\text{F}$, $1 \mu\text{F}$ dan $10 \mu\text{F}$ tidak terjadi feroresonansi ketika *circuit breaker* dibuka pada saat $t = 0.1 \text{ s}$. Feroreonansi yang muncul ketika nilai kapasitansi C_g bernilai $0.01 \mu\text{F}$ merupakan feroresonansi dengan tipe *quasi-periodic mode*. Sedangkan ketika nilai nilai kapasitansi C_g bernilai $0.1 \mu\text{F}$ merupakan feroresonansi dengan tipe *subharmonic mode*. Kedua feroresonansi tersebut dapat terjadi akibat adanya interaksi antara reaktansi kapasitif dengan reaktansi

induktif dari induktor nonlinear transformator yang melampaui titik saturasi inti transformator.

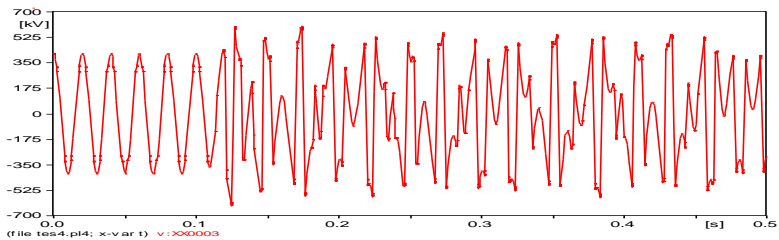
4.2.2 Feroresonansi dengan Mengubah Parameter C_{sh}

Dalam simulasi ini digunakan nilai kapasitif dari saluran transmisi yang dimodelkan dengan C_{sh} pada perangkat lunak ATP Draw. Feroresonansi yang didapatkan dengan mengubah nilai kapasitif pada C_{sh} di rangkaian feroresonansi dengan rentang nilai kapasitif tertentu. Rangkaian simulasi feroresonansi dapat dilihat pada gambar 4.7

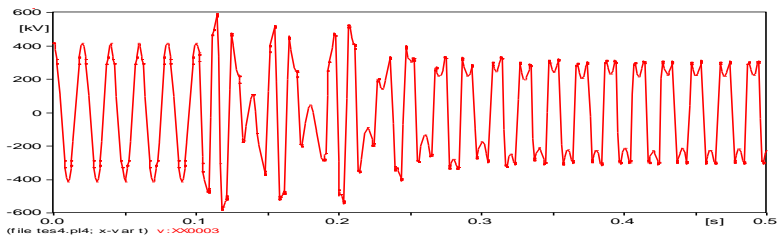


Gambar 4.7 Rangkaian Feroresonansi dengan mengubah parameter C_{sh}

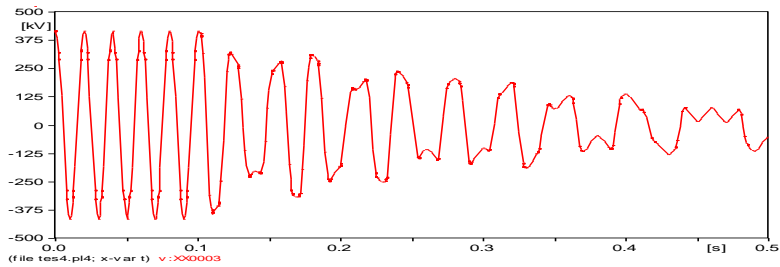
Nilai kapasitif C_{sh} diubah-ubah dengan rentang nilai $0.001 - 10 \mu\text{F}$ pada simulasi ini. Dengan nilai C_g yang dibuat tetap yaitu sebesar 8.2 nF . *Switch* akan dibuka pada saat $t = 0.1 \text{ s}$. Simulasi rangkaian feroresonansi akan dijalankan selama 0.5 s . Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan pada sisi primer dari transformator daya.



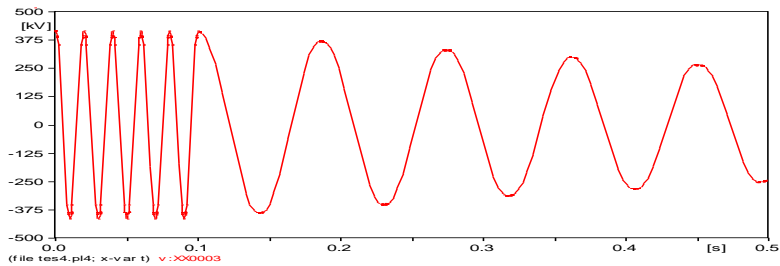
(a)



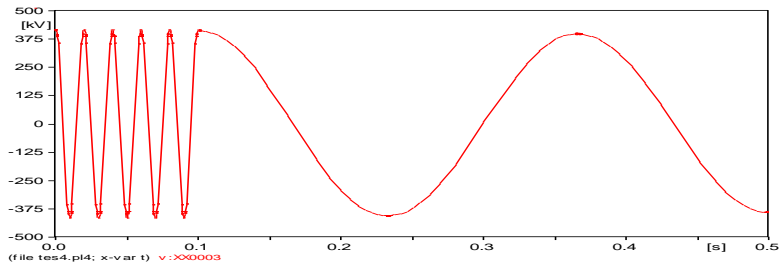
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.8 Respon tegangan pada sisi primer saat C_{sh} bernilai (a) $0.001 \mu F$ (b) $0.01 \mu F$ (c) $0.1 \mu F$ (d) $1 \mu F$ (e) $10 \mu F$

Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa masing-masing nilai kapasitansi yang memiliki rentang nilai yang berbeda-beda dapat menimbulkan ada tidaknya feroresonansi. Tabel 4.3 merupakan hasil dari rangkaian feroresonansi yang telah disimulasikan ketika nilai tegangan puncak sebelum dan sesudah *switch* dibuka.

Tabel 4.3 Efek perubahan nilai C_{sh}

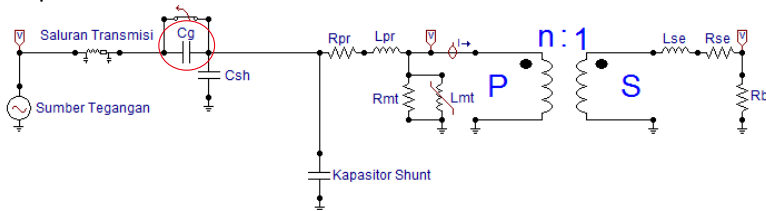
C_{sh} (μF)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0.001	414.34	601.4	Ya
0.01	414.34	591.06	Ya
0.1	414.34	300.5	Tidak
1	414.34	400.8	Tidak
10	414.34	395.4	Tidak

Dapat dilihat dari gambar 4.8 serta dari tabel 4.3 bahwa ketika nilai kapasitansi pada C_{sh} bernilai sebesar 0.1 μF , 1 μF dan 10 μF tidak terjadi feroreonansi ketika *circuit breaker* dibuka pada saat $t = 0.1$ s. Sedangkan saat nilai kapasitansi pada C_{sh} bernilai sebesar 0.001 μF dan 0.01 μF terdapat lonjakan tegangan dan terdapat harmonisa. Feroreonansi yang muncul ketika nilai kapasitansi C_{sh} bernilai 0.01 μF merupakan feroreonansi dengan cenderung ke tipe *chaotic mode*. Sedangkan saat nilai kapasitansi C_{sh} bernilai 0.1 μF merupakan feroreonansi dengan cenderung ke tipe *subharmonic mode* ketika transient namun berubah menjadi *fundamental mode* saat menuju steady state.

4.3 Mitigasi Feroresonansi

4.3.1 Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Shunt Akibat Perubahan C_g

Feroresonansi yang terjadi diakibatkan karena nilai kapasitansi dari C_g . Gambar 4.9 merupakan pemodelan rangkaian mitigasi feroreonansi dengan penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer. Perubahan nilai kapasitansi pada C_g yang digunakan sebesar 0.01 μF dan 0.1 μF .



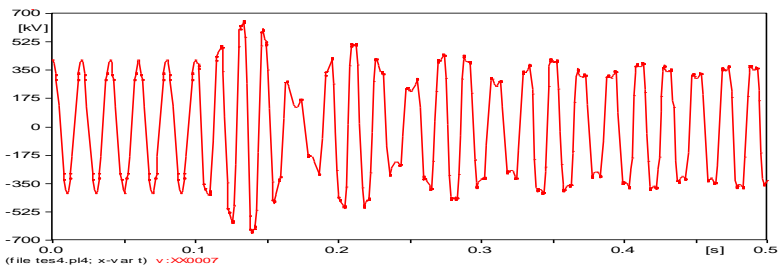
Gambar 4.9 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer akibat kapasitansi C_g .

Pada gambar 4.9 merupakan rangkaian mitigasi feroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada C_g . Nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.01 \mu\text{F}$. Tabel 4.4 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer.

Tabel 4.4 Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$

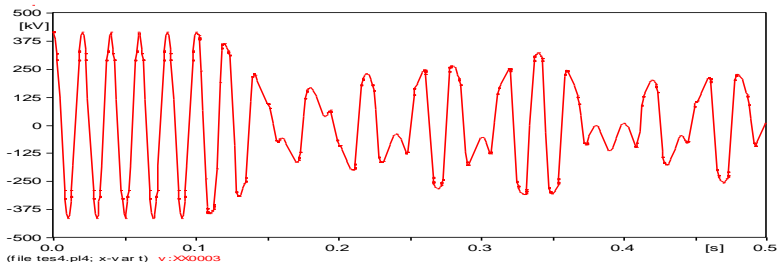
Kapasitor Shunt (nF)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
20	414.34	652.42	Ya
40	414.34	740.87	Ya
60	414.34	341.96	Tidak
80	414.34	320.31	Tidak

Data pada tabel 4.4 menunjukkan dengan penambahan kapasitor shunt terhadap feroresonansi ketika nilai C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari feroresonansi. Gambar 4.10 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang kurang tepat yaitu sebesar 20 nF . Terlihat dari gambar 4.10 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan kapasitor shunt pada sisi primer dari transformator daya.



Gambar 4.10 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt pada sisi primer sebesar 20 nF .

Nilai kapasitansi kapasitor shunt yang ditambahkan sebesar 60 nF memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.11 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor shunt sebesar 60 nF.



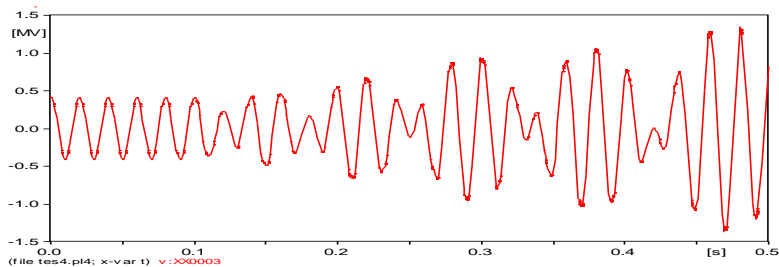
Gambar 4.11 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 60 nF pada sisi primer.

Lalu ketika nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar 0.1 μF . Tabel 4.5 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer.

Tabel 4.5 Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF

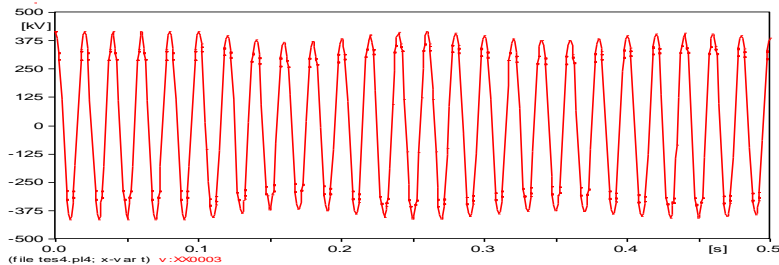
Kapasitor Shunt (nF)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
20	414.34	8333.91	Ya
40	414.34	413.25	Tidak
60	414.34	1317.3	Ya
80	414.34	942.7	Ya

Data pada tabel 4.5 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang masih menunjukkan lonjakan tegangan. Gambar 4.12 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang kurang tepat yaitu sebesar 60 nF.



Gambar 4.12 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt pada sisi primer 60 nF .

Nilai kapasitansi kapasitor shunt yang ditambahkan sebesar 40 nF memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.13 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor shunt sebesar 40 nF .

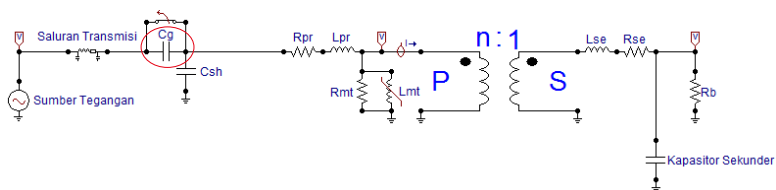


Gambar 4.13 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 40 nF pada sisi primer.

4.3.2 Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Sekunder Akibat Perubahan C_g

Untuk mengetahui dampak yang terjadi pada feroresonansi yang ditimbulkan akibat kapasitansi pada C_g adalah dengan menambahkan kapasitor bank pada sisi sekunder dari transformator daya. Perubahan nilai kapasitansi pada C_g yang digunakan sebesar $0.01 \mu\text{F}$ dan $0.1 \mu\text{F}$.

Pada gambar 4.14 merupakan rangkaian mitigasi feroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada C_g . Nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.01 \mu\text{F}$. Tabel 4.6 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor sekunder pada sisi kumparan sekunder.



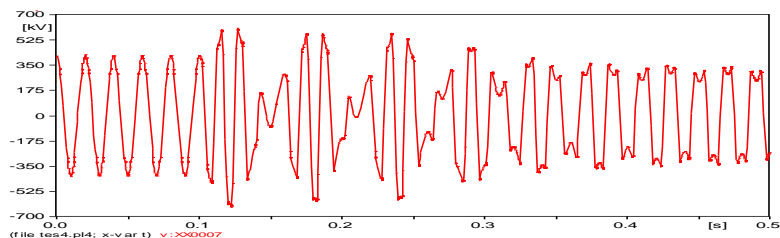
Gambar 4.14 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_g .

Data pada tabel 4.6 menunjukkan dengan penambahan kapasitor sekunder terhadap feroresonansi ketika nilai C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari feroresonansi.

Tabel 4.6 Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$

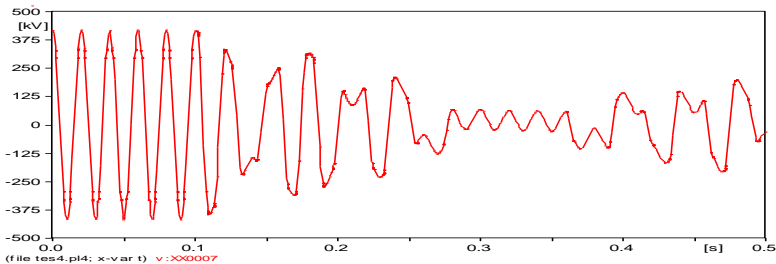
Kapasitor Sekunder (MVAR)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0.5	414.34	605.26	Ya
1	414.34	645.06	Ya
3	414.34	746.2	Ya
5	414.34	336	Tidak

Gambar 4.15 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang kurang tepat yaitu sebesar 0.5 MVAR. Terlihat dari gambar 4.15 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.15 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 0.5 MVAR pada sisi sekunder.

Nilai kapasitansi kapasitor sekunder yang ditambahkan sebesar 5 MVAR memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.16 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 5 MVAR.



Gambar 4.16 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.

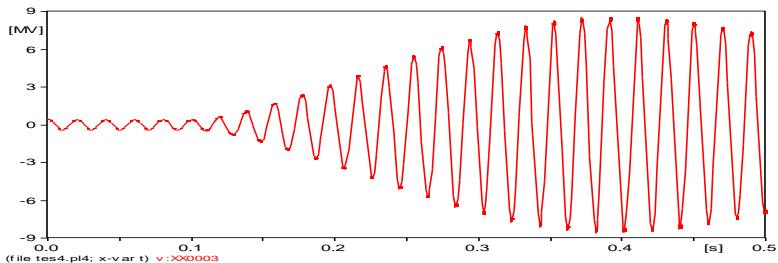
Lalu ketika nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Tabel 4.7 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor sekunder pada sisi kumparan sekunder.

Tabel 4.7 Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$

Kapasitor Sekunder (MVAR)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0.5	414.34	5661.9	Ya
1	414.34	8333.91	Ya
3	414.34	9032.7	Ya
5	414.34	359.39	Tidak

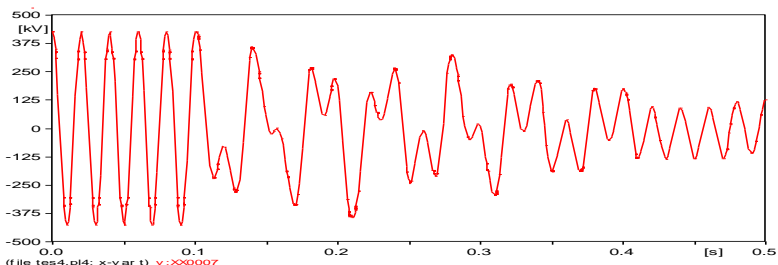
Data pada tabel 4.7 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang masih menunjukkan lonjakan tegangan. Gambar 4.17 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor sekunder yang kurang tepat yaitu sebesar 1 MVAR. Terlihat dari gambar 4.17 tidak adanya perubahan terhadap feroresonansi yang terjadi akan tetapi membuat bertambah besar nilai puncak tegangannya ketika diberi

penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.17 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 1 MVAR pada sisi sekunder.

Kapasitor sekunder yang ditambahkan sebesar 5 MVAR memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.18 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 5 MVAR.

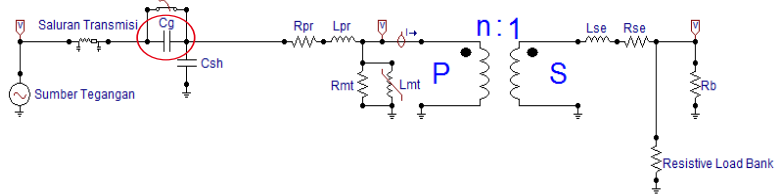


Gambar 4.18 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.

4.3.3 Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Resitive Load Bank Akibat C_g

Selain dengan menambahkan elemen kapasitor pada sisi sekunder dan sisi primer dapat juga dengan menambahkan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya untuk memtigitasi feroresonansi. Feroresonansi yang terjadi pada rangkaian dikarenakan C_g dengan nilai kapasitansi $0.01 \mu\text{F}$ dan $0.1 \mu\text{F}$. Pada gambar 4.19 merupakan rangkaian mitigasi feroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada C_g .

Nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.01 \mu\text{F}$. Tabel 4.8 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan resistive load bank pada sisi kumparan sekunder.



Gambar 4.19 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_g .

Data pada tabel 4.8 menunjukkan dengan penambahan resistive load bank terhadap feroresonansi ketika nilai C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari feroresonansi.

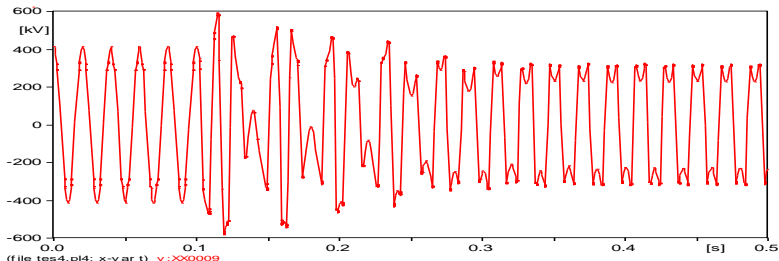
Tabel 4.8 Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$

Resistive Load Bank (MW)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
1	414.34	3.5	Tidak
0.5	414.34	47	Tidak
0.3	414.34	187.2	Tidak
0.1	414.34	589.5	Ya

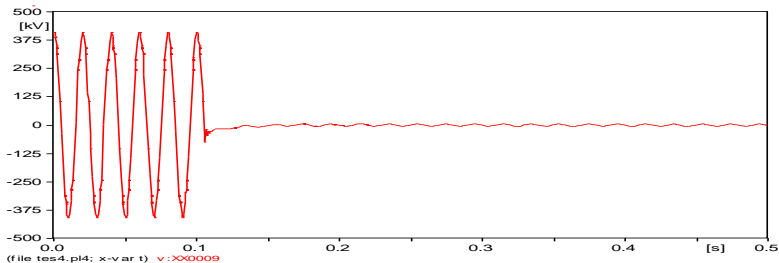
Gambar 4.20 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan resistive load bank yang kurang tepat yaitu sebesar 0.1 MW. Terlihat dari gambar 4.20 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya.

Resitive Load Bank yang ditambahkan sebesar 0.5 MW memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.21

merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan resistive load bank sebesar 0.5 MW.



Gambar 4.20 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.



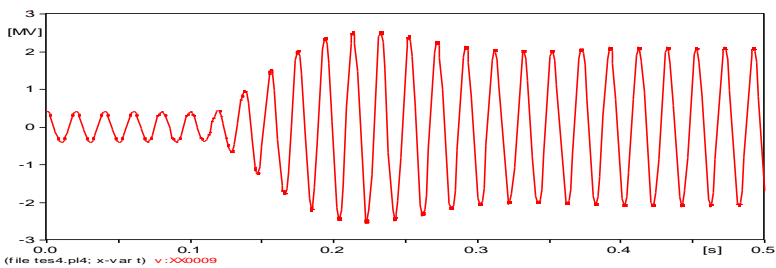
Gambar 4.21 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.5 MW pada sisi sekunder.

Lalu ketika nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.1 \mu\text{F}$. Tabel 4.9 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer.

Tabel 4.9 Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_g sebesar $0.1 \mu\text{F}$

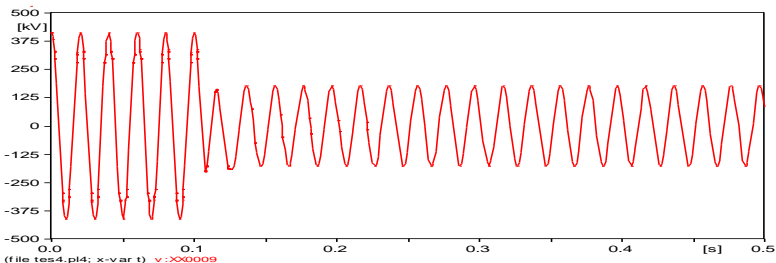
Resistive Load Bank (MW)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
1	414.34	15	Tidak
0.5	414.34	178	Tidak
0.3	414.34	1692	Ya
0.1	414.34	2514.5	Ya

Data pada tabel 4.9 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang masih menunjukkan lonjakan tegangan. Gambar 4.22 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan resistive load bank yang kurang tepat yaitu sebesar 0.1 MW. Terlihat dari gambar 4.22 tidak adanya perubahan terhadap feroresonansi yang terjadi akan tetapi membuat bertambah besar nilai puncak tegangannya ketika diberi penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.22 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.

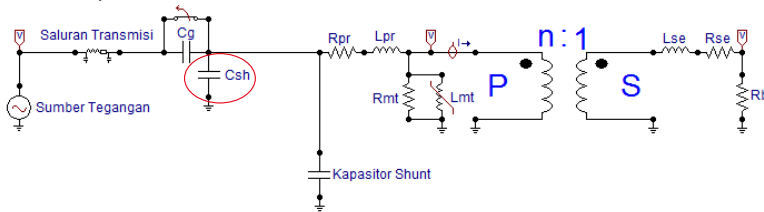
Resistive load bank yang ditambahkan sebesar 0.5 MW memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_g sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.23 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 0.5 MW.



Gambar 4.23 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_g sebesar 0.1 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.5 MW pada sisi sekunder.

4.3.4 Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Shunt Akibat Perubahan C_{sh}

Feroresonansi yang muncul dikarenakan terdapat kapasitansi pada saluran. Mitigasi feroresonansi dilakukan dengan menambahkan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer dari transformator daya. Gambar 4.24 merupakan pemodelan rangkaian mitigasi feroresonansi dengan penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer. Perubahan nilai kapasitansi pada C_{sh} yang digunakan sebesar $0.001 \mu F$ dan $0.01 \mu F$.



Gambar 4.24 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer akibat C_{sh} .

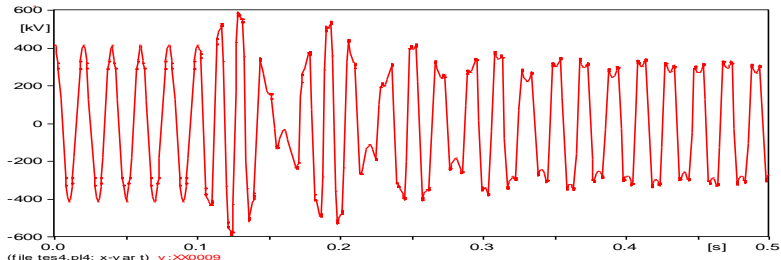
Pada gambar 4.24 merupakan rangkaian mitigasi feroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada saluran. Nilai C_{sh} yang digunakan sebesar $0.001 \mu F$. Tabel 4.10 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer.

Tabel 4.10 Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$

C_{sh} (nF)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
20	414.34	590.51	Ya
40	414.34	633.8	Ya
60	414.34	362	Tidak
80	414.34	347.24	Tidak

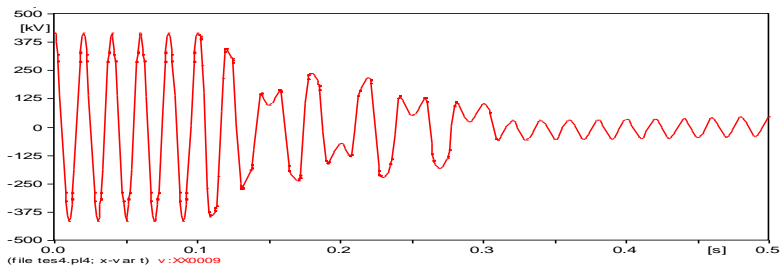
Data pada tabel 4.10 menunjukkan dengan penambahan kapasitor shunt terhadap feroresonansi ketika nilai C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari feroresonansi. Gambar 4.25 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang

kurang tepat yaitu sebesar 20 nF. Terlihat dari gambar 4.25 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan kapasitor shunt pada sisi primer dari transformator daya.



Gambar 4.25 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt pada sisi primer 20 nF.

Nilai kapasitansi kapasitor shunt yang ditambahkan sebesar 80 nF memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.26 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor shunt sebesar 80 nF.



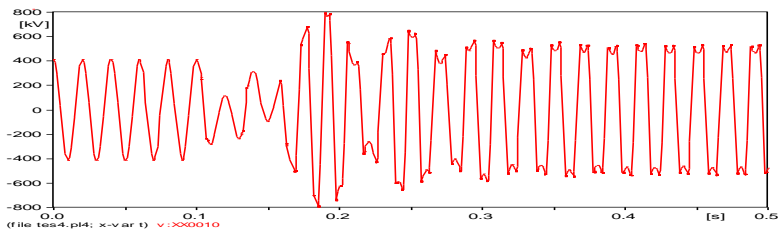
Gambar 4.26 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 80 nF pada sisi primer.

Lalu ketika nilai kapasitansi C_{sh} yang digunakan sebesar $0.01 \mu F$. Tabel 4.11 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum penambahan kapsitor shunt dan sesudah penambahan kapasitor shunt pada sisi kumparan primer transformator daya.

Tabel 4.11 Efek penambahan Kapasitor Shunt pada sisi primer untuk Mitigasi Ferroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$

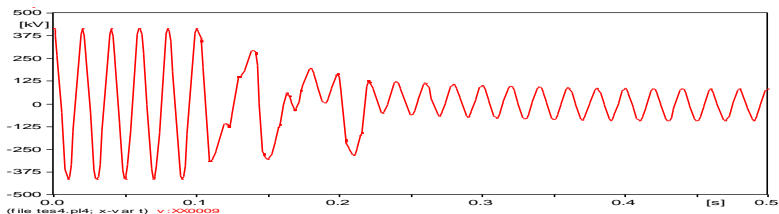
C_{sh} (nF)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Ferroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
20	414.34	789.29	Ya
40	414.34	293.39	Tidak
60	414.34	281.69	Tidak
80	414.34	257.47	Tidak

Data pada tabel 4.11 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang terdapat pada sisi primer dari transformator daya. Gambar 4.27 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan ferroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang kurang tepat yaitu sebesar 20 nF.



Gambar 4.27 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Ferroresonansi dengan menambahkan C_{sh} pada sisi primer 20 nF.

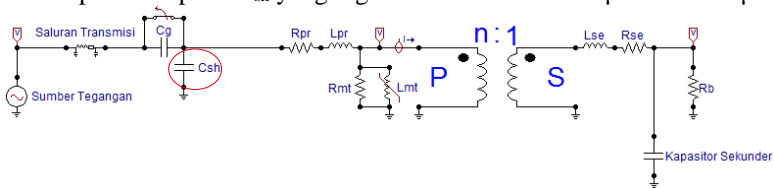
Nilai kapasitansi kapasitor shunt yang ditambahkan sebesar 40 nF memberikan dampak pada ferroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sehingga ferroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.28 merupakan gambar mitigasi ferroresonansi ketika penambahan kapasitor shunt sebesar 40 nF.



Gambar 4.28 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Ferroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Shunt sebesar 40 nF pada sisi primer.

4.3.5 Mitigasi Ferroresonansi dengan Menambahkan Kapasitor Sekunder Akibat Perubahan C_{sh}

Untuk mengetahui dampak yang terjadi pada ferroresonansi yang ditimbulkan akibat kapasitansi pada C_{sh} adalah dengan menambahkan kapasitor bank pada sisi sekunder dari transformator daya. Perubahan nilai kapasitansi pada C_{sh} yang digunakan sebesar $0.001 \mu\text{F}$ dan $0.01 \mu\text{F}$.



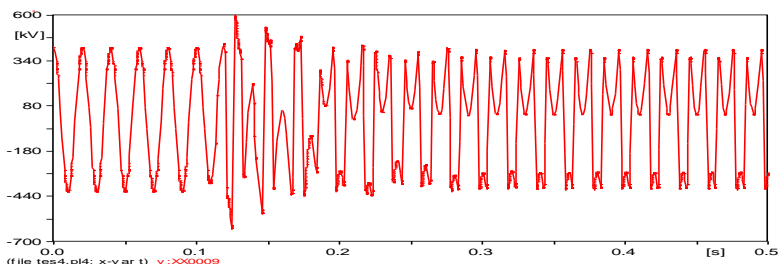
Gambar 4.29 Rangkaian Mitigasi Ferroresonansi dengan penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_{sh} .

Pada gambar 4.29 merupakan rangkaian mitigasi ferroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada C_{sh} . Nilai kapasitansi C_{sh} yang digunakan sebesar $0.001 \mu\text{F}$. Tabel 4.12 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor sekunder pada sisi kumparan sekunder.

Tabel 4.12 Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Ferroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu\text{F}$

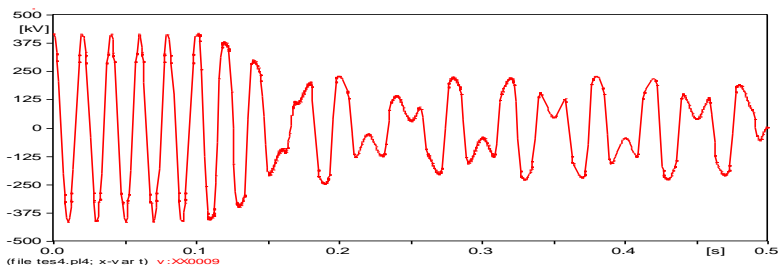
Kapasitor Sekunder (MVAR)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Ferroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0.5	414.34	599.5	Ya
1	414.34	586.12	Ya
3	414.34	617.02	Ya
5	414.34	381.25	Tidak

Data pada tabel 4.12 menunjukkan dengan penambahan kapasitor sekunder terhadap ferroresonansi ketika nilai C_{sh} sebesar $0.001 \mu\text{F}$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari ferroresonansi. Gambar 4.30 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan ferroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor shunt yang kurang tepat yaitu sebesar 0.5 MVAR . Terlihat dari gambar 4.30 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.30 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 0.5 MVAR pada sisi sekunder.

Nilai kapasitansi kapasitor sekunder yang ditambahkan sebesar 5 MVAR memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.31 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 5 MVAR .



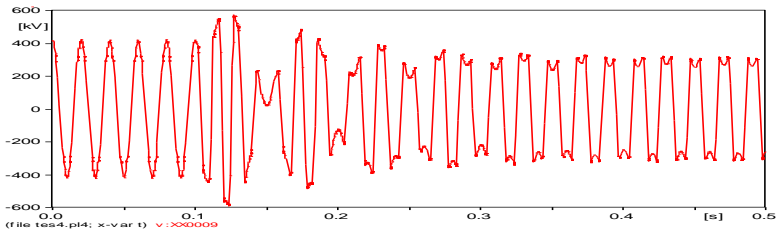
Gambar 4.31 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.

Lalu ketika nilai kapasitansi C_g yang digunakan sebesar $0.01 \mu F$. Tabel 4.13 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumpulan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor sekunder pada sisi kumpulan sekunder. Data pada tabel 4.13 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang masih menunjukkan lonjakan tegangan. Gambar 4.32 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan kapasitor sekunder yang kurang tepat yaitu sebesar 1 MVAR . Terlihat dari gambar 4.32 tidak adanya perubahan terhadap

feroresonansi yang terjadi ketika diberi penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.

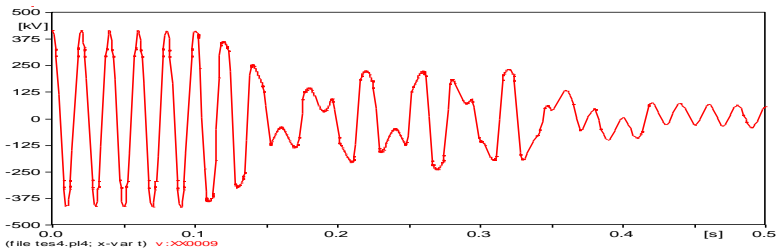
Tabel 4.13 Efek penambahan Kapasitor Sekunder pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF

Kapasitor Sekunder (MVAR)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
0.5	414.34	572.03	Ya
1	414.34	594.79	Ya
3	414.34	364.07	Tidak
5	414.34	336	Tidak



Gambar 4.32 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 1 MVAR pada sisi sekunder.

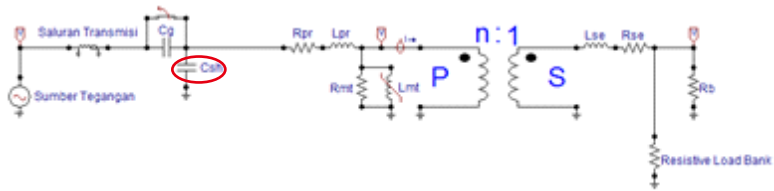
Kapasitor sekunder yang ditambahkan sebesar 3 MVAR memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.33 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 3 MVAR.



Gambar 4.33 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar 0.01 μF untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Kapasitor Sekunder sebesar 5 MVAR pada sisi sekunder.

4.3.6 Mitigasi Feroresonansi dengan Menambahkan Resitive Load Bank Akibat C_{sh}

Selain dengan menambahkan elemen kapasitor pada sisi sekunder dan sisi primer dapat juga dengan menambahkan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya untuk memitigasi feroresonansi. Feroresonansi yang terjadi pada rangkaian dikarenakan C_{sh} dengan nilai kapasitansi $0.001 \mu F$ dan $0.01 \mu F$.



Gambar 4.34 Rangkaian Mitigasi Feroresonansi dengan penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder akibat kapasitansi C_{sh} .

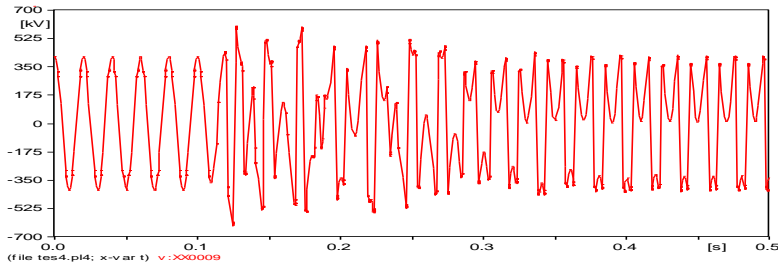
Pada gambar 4.34 merupakan rangkaian mitigasi feroresonansi yang diakibatkan oleh nilai kapasitansi pada C_{sh} . Nilai kapasitansi C_{sh} yang digunakan sebesar $0.001 \mu F$. Tabel 4.14 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumpulan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan resistive load bank pada sisi kumpulan sekunder.

Tabel 4.14 Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$

Resistive Load Bank (MW)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
1	414.34	98.5	Tidak
0.5	414.34	242.41	Tidak
0.3	414.34	553.74	Ya
0.1	414.34	602.55	Ya

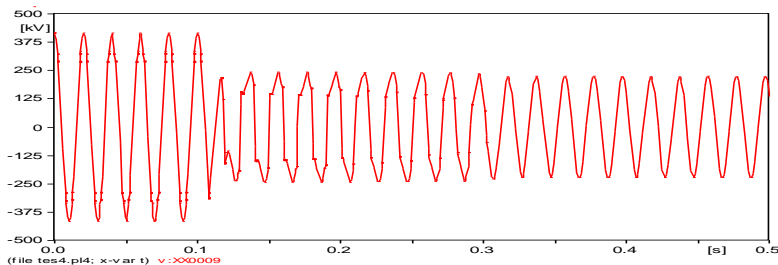
Data pada tabel 4.14 menunjukkan dengan penambahan resistive load bank terhadap feroresonansi ketika nilai C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ memperlihatkan terdapat dampak yang dapat mengurangi akibat dari feroresonansi. Gambar 4.35 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan serta terdapat harmonisa sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan resistive load bank yang

kurang tepat yaitu sebesar 0.1 MW. Terlihat dari gambar 4.35 tidak adanya perbedaan yang signifikan ketika diberi penambahan resistive load bank pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.35 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.

Resistive Load Bank yang ditambahkan sebesar 0.5 MW memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sehingga feroresonansi dapat berkurang. Pada gambar 4.36 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan resistive load bank sebesar 0.5 MW.



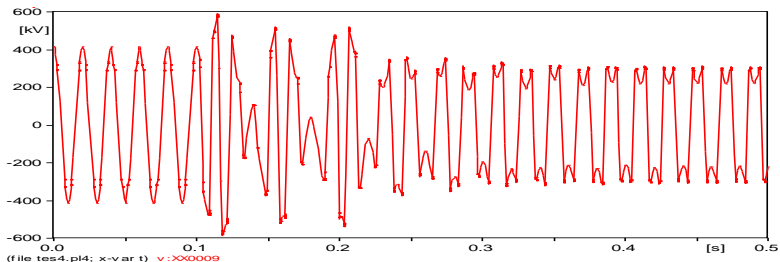
Gambar 4.36 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.001 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.5 MW pada sisi sekunder.

Lalu ketika nilai kapasitansi C_{sh} yang digunakan sebesar $0.01 \mu F$. Tabel 4.15 merupakan tabel respon tegangan pada sisi kumparan primer hasil perbandingan sebelum dan sesudah penambahan resistive load bank pada sisi kumparan sekunder. Data pada tabel 4.15 menunjukkan banyaknya respon tegangan yang masih menunjukkan lonjakan tegangan.

Tabel 4.15 Efek penambahan Resistive Load Bank pada sisi sekunder untuk Mitigasi Feroresonansi akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$

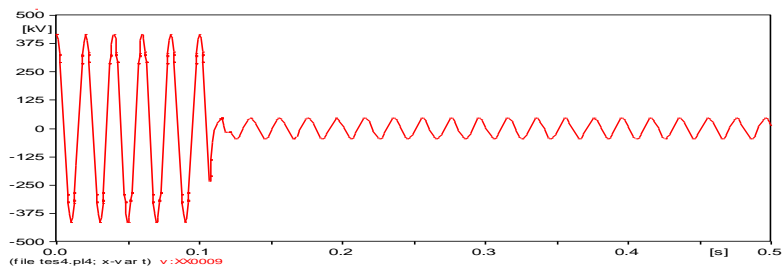
Resistive Load Bank (MW)	Tegangan Puncak Trafo (kV)		Feroresonansi
	Sebelum	Sesudah	
1	414.34	46	Tidak
0.5	414.34	359.42	Tidak
0.3	414.34	502.64	Ya
0.1	414.34	598.07	Ya

Gambar 4.37 merupakan gambar yang menunjukkan lonjakan tegangan sehingga mengakibatkan feroresonansi yang terjadi akibat penambahan resistive load bank yang kurang tepat yaitu sebesar 0.1 MW. Terlihat dari gambar 4.37 tidak adanya perubahan terhadap feroresonansi yang terjadi akan tegangannya ketika diberi penambahan kapasitor sekunder pada sisi sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.37 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ untuk Mitigasi Feroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 0.1 MW pada sisi sekunder.

Resistive load bank yang ditambahkan sebesar 1 MW pada sisi kumparan sekunder pada transformator daya memberikan dampak pada feroresonansi yang diakibatkan oleh kapasitansi C_{sh} sebesar $0.01 \mu F$ sehingga feroresonansi dapat berkurang seperti tidak terdapat *overvoltage* dan tidak terdapat harmonisa pada gelombangnya. Pada gambar 4.38 merupakan gambar mitigasi feroresonansi ketika penambahan kapsitor sekunder sebesar 1 MW pada sisi kumparan sekunder dari transformator daya.



Gambar 4.38 Respon tegangan pada sisi primer akibat perubahan C_{sh} sebesar $0.01 \mu\text{F}$ untuk Mitigasi Ferroresonansi dengan menambahkan Resistive Load Bank sebesar 1 MW pada sisi sekunder.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui simulasi terhadap mitigasi feroresonansi menggunakan impedansi yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Feroresonansi yang terdapat pada rangkaian pemodelan transformator daya dengan mengubah parameter C_g dan C_{sh} . Ketika feroresonansi akibat mengubah parameter C_g terjadi *overvoltage* dengan tegangan puncak 1.53 kali dari tegangan awalnya untuk nilai kapasitansi 0.01 μF dan 10.73 kali dari tegangan awalnya untuk nilai kapasitansi 0.1 μF . Sedangkan ketika feroresonansi akibat mengubah parameter C_{sh} terjadi *overvoltage* dengan tegangan puncak 1.45 kali dari tegangan awalnya untuk nilai kapasitansi 0.001 μF dan 1.43 kali dari tegangan awalnya untuk nilai kapasitansi 0.01 μF . Perubahan frekuensi yang terjadi pada saat nilai C_{sh} dibesarkan.
2. Mitigasi feroresonansi pada saat perubahan nilai C_g dan C_{sh} yang berubah-ubah antara 0.01 dan 0.1 μF untuk C_g dan C_{sh} yang bernilai 0.001 μF dan 0.01 μF berhasil diredam. Dengan menambahkan kapasitor shunt pada sisi primer, kapasitor sekunder pada sisi sekunder dan resistive load bank dengan nilai yang tepat. Nilai dari kapasitor shunt dapat meredam feroresonansi ketika bernilai 40 – 80 nF. Nilai dari kapasitor sekunder yang dapat meredam feroresonansi dari rentang 3 – 5 MVAR. Nilai dari resistive load bank yang dapat meredam feroresonansi sebesar 0.3 – 1 MW.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini adalah melakukan simulasi feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik dengan melihat komponen yang dapat memungkinkan terjadinya feroresonansi. Dalam melakukan simulasi feroresonansi untuk mengatasi feroresonansi diperlukan usaha yang lebih baik lagi karena penambahan impedansi ini masih banyak kekurangan sehingga feroresonansi dapat lebih teratasi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Martinez, G. Antonova and M. Olgun, "*Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects*", IPST 2013, Vancouver, 2013.
- [2] Ferraci, P., "*Ferroresonance*", Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998.
- [3] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [4] W. H. Hayt Jr, J. A. Buck, "*Engineering Electromagnetics 8th edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2010
- [5] D. A. N. Jacobson, "*Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System*", IEEE 2003.
- [6] Price, Elmo, "*A Tutorial on Ferroresonance*", ABB Inc.
- [7] CIGRE Working Group C4.307, "*Resonance and ferroresonance in power networks*," CIGRE, Tech. Bro. TB-569, Feb, 2014
- [8] S. I. Kim, B. C. Sung, S. N. Kim, Y. C. Choi, and H. J. Kim, "*A Study on Ferroresonance Mitigation Techniques for Power Transformer*". International Conference on Power System Transients (IPST2015) in Cavtat, Croatia June 15-18, 2015. IPST 2015
- [9] Wijayanto, Novandi, "*Studi Ferroresonance akibat Sambaran Petir pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) Saluran Transmisi 500 kV*". ITS 2015
- [10] A. C. A. Javier, "*Modeling and Analysis of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon*". Universitat Rovira I Virgili 2015

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

LAMPIRAN

BEGIN NEW DATA CASE

C -----
 C Generated by ATPDRAW May, Friday 26, 2017
 C A Bonneville Power Administration program
 C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-
 2015

C -----
 C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
 1.E-6 .5
 500 1 1 1 1 0
 0 1 0
 C 1 2 3 4 5
 6 7 8
 C

345678901234567890123456789012345678901234567890
 123456789012345678901234567890

/BRANCH

C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
 C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B
 ><Leng><><>0

1	XX0010XX0008	.06365	4.685	63.7	
	XX0008XX0001			.0082	0
	XX0001XX0002	12.			0
	XX0002XX0009		1027.2		0
	XX0009	3.11E6			0
98	XX0009	0.0	0.0		0
	0.001035406	520.0556			
	0.002694945	566.5484			
	0.005402952	611.0486533			
	0.008877328	645.2578267			
	0.010996007	664.18336			
	0.017878287	717.3179733			
	0.022856605	740.56428			
	0.03172149	777.0939333			
	0.047757483	810.3032267			
	2.585303208	923.2144533			
	9.22409	1354.934			

```

10.74944792      1461.2032
9999
XX0004XX0011      .0012      0
XX0003XX0004      .33614      0
XX0001      .01      0
XX0011      1375.      0
      XX0005      105.      0
XX0011      600.      0
XX0006XX0007      1.5E5      0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie
><Vf/CLOP >< type >
      XX0008XX0001      -1.      .1      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1
>< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14XX0010      408248.      50.      -1.      100.
14XX0009      1.E-20      50.      -1.      10.
18      55.29XX0003
/OUTPUT
      XX0009XX0010
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Palembang pada tanggal 4 Mei 1995 dengan nama lengkap Charell Naufal Kiramindy, dari orang tua Harry Purwanto dan Melly Elvira. Penulis bersekolah di SDN Gunung Batu I di tahun 2001-2007, lalu melanjutkan pendidikan ke SMPN 6 Bogor di tahun 2007-2010. Setelah itu penulis melanjutkan sekolah di SMAN 3 Bogor di tahun 2010-2013. Saat ini penulis sedang menempuh studi S1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai fokus studinya. Selama kuliah penulis aktif dalam berbagai kegiatan. Penulis dapat dihubungi melalui email: charellkira@gmail.com.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---